Microlog Microfiche Collection
Resolution Chart

Copyright

Copyright for the ***contents*** of this microfiche is held by the publisher of the original document. Please contact the original publisher for guidance in all copyright matters. Copyright in this ***microfiche edition*** is held by Micromedia Limited.

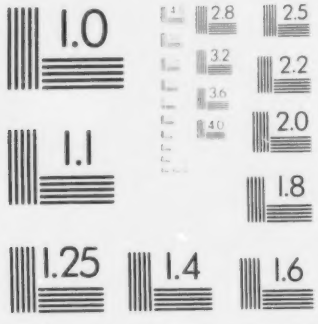
Quality of the Microfiche Reproduction

Micromedia Limited maintains the highest standards for micrographic reproduction. Attempts are made to obtain the best quality print version to microfilm. However, there are some printing styles, colours and graphic layout styles (including maps, graphs and tables) which do not reproduce well. Because of the value of the original document, Micromedia has filmed it recognizing that it may not be as easy to read as the original document.

Some pages have been filmed twice to improve the clarity of the reproduction. Consult both reproductions to ensure that all of the original text is read.

Microcopy Resolution Test Chart
National Bureau of Standards
Standard Reference Material 1010a
(ANSI and ISO Test Chart No. 2)

PM-1 3½"x4" PHOTOGRAPHIC MICROCOPY TARGET
NBS 1010a ANSI/ISO #2 EQUIVALENT



MS109

NATIONAL MICROGRAPHICS ASSOCIATION

24x

micromedia
a division of IHS Canada

20 Victoria Street, Toronto, ON M5C 2N8
Tel.: (416) 362-5211
Toll free: 1-800-387-2689
Fax: (416) 362-6161

Collection MICROLOG sur Micromédia
Tableau de résolution

Droits d'auteurs

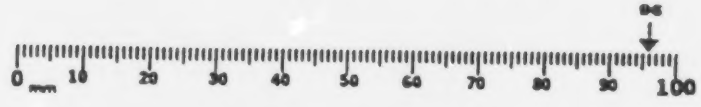
Les droits d'auteurs du conenu de cette microfiche sont détenus par l'éditeur du document original. Veuillez communiquer avec celui-ci pour obtenir des renseignements sur tout ce qui touche les droits d'auteurs. Les droits d'auteurs de cette édition sur microfiche sont détenus par Micromédia Limitée.

Qualité de reproduction sur microfiche

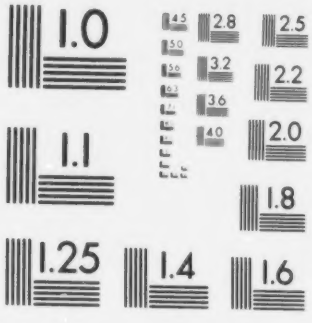
Micromédia Limitée maintient les normes de reproduction micrographique les plus élevées. Elle fait tout son possible pour obtenir la version sur papier à reproduire sur microfiche de la meilleure qualité possible. Cependant, certains styles d'imprimerie, de couleurs et de style de mise en page graphique (incluant des cartes, des grahiques et des tableaux) se reproduisent mal. En raison de la valeur du document original, Micromédia l'a reproduit tout en reconnaissant qu'il ne sera peut-être pas aussi lisable que le document original.

Tableau de résolution micrographique

National Bureau of Standards
Standard Reference Material 1010a
(ANSI and ISO Test Chart No. 2)



PM-1 3½"x4" PHOTOGRAPHIC MICROCOPY TARGET
NBS 1010a ANSI/ISO #2 EQUIVALENT



MS109

NATIONAL MICROGRAPHICS ASSOCIATION

24x

micromedia
a division of IHS Canada

20 Victoria Street, Toronto, ON M5C 2N8
Tel.: (416) 362-5211
Toll free: 1-800-387-2689
Fax: (416) 362-6161

RAPPORT DE RECHERCHE

ANALYSE PARAMÉTRIQUE DE L'ASSÈCHEMENT DES MURS REVÊTUS DE STUCCO VENTILÉ

SÉRIE SUR LES TECHNOLOGIES DU BÂTIMENT

SCHL CMHC

AU COEUR DE L'HABITATION

Canada

SCHL—Au cœur de l'habitation

La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) est au cœur de l'habitation. Toutes ses activités visent à aider les Canadiens et les Canadiennes à vivre dans un logement sûr à tout point de vue.

À titre d'organisme national responsable du logement, la SCHL joue un rôle important dans le secteur canadien de l'habitation. Elle propose de nouvelles façons de financer l'achat des maisons. Elle favorise l'innovation dans le domaine de la technologie et de la conception des habitations. Grâce à son assurance prêt hypothécaire, elle aide les Canadiens et les Canadiennes à réaliser leur rêve et à posséder leur propre maison.

Les Canadiens et les Canadiennes tirent avantage de la collaboration de la SCHL avec ses partenaires des secteurs public, privé et sans but lucratif en vue d'améliorer la qualité et l'accessibilité des logements et de faire en sorte qu'ils soient plus abordables, partout au pays.

L'aide accordée par la SCHL permet aux ménages à faible revenu, aux aînés, aux personnes handicapées et aux Autochtones de vivre dans des logements convenables et abordables. La SCHL crée des emplois pour les Canadiens et les Canadiennes dans le domaine des produits et services en aidant le secteur de l'habitation à exporter ses connaissances et ses compétences dans d'autres pays.

Les recherches de pointe effectuées par la SCHL améliorent la qualité des logements et font en sorte que ceux-ci soient plus abordables. Afin d'aider les Canadiens et les Canadiennes à tirer profit de son savoir-faire dans le domaine de l'habitation et à prendre des décisions éclairées, la SCHL est devenue le plus important éditeur canadien de publications portant sur le logement. Elle possède également la collection la plus complète de documents sur l'habitat.

Les Canadiens et les Canadiennes peuvent avoir facilement accès à nos informations par l'entremise des points de vente et des bureaux régionaux de la SCHL.

Vous pouvez aussi communiquer avec nous par téléphone :
1 800 668-2642 [à l'extérieur du Canada : (613) 748-2003]
ou par télécopieur : (613) 748-4069.
Pour nous joindre en direct, visitez notre page d'accueil à l'adresse suivante : « www.cmhc-schl.gc.ca »

La Société canadienne d'hypothèques et de logement appuie la politique du gouvernement fédéral sur l'accès à l'information pour les personnes handicapées. Si vous désirez obtenir la présente publication en des médias substituts, composez le 1 800 668-2642.

ANALYSE PARAMÉTRIQUE DE L'ASSÈCHEMENT DES MURS REVÊTUS DE STUCCO VENTILÉ

par
Donald M. Onysko
DMO Associates

La SCHL offre de nombreux renseignements relatifs à l'habitation. Pour plus d'information, veuillez composer le 1 800 668-2642 ou visitez notre site Web : www.cmhc-schl.gc.ca

This publication is also available in English under the title: *Drying of Walls with Ventilated Stucco Cladding: a Parametric Analysis, PE 0375*

Cette recherche a été financée (en partie) par la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL). La qualité rédactionnelle de ce rapport, son contenu et les opinions qui y sont émises sont de l'auteur. La SCHL ne saurait en assumer la responsabilité et se dégage de toute obligation relativement aux conséquences résultant de l'utilisation que le lecteur pourrait faire des renseignements, des matériaux ou des techniques qui y sont décrits.

Données de catalogage avant publication (Canada)

Onysko, D.M.

Analyse paramétrique de l'assèchement des murs revêtus de stucco ventilé

Publ. aussi en anglais sous le titre : Drying of walls with ventilated stucco cladding, a parametric analysis.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-660-96298-5
No de cat. NH15-346/20[illegible]

1. Stuc — Humidité — Essai.
2. Murs extérieurs — Humidité — Essai.
I. Société canadienne d'hypothèques et de logement.
II. Titre.

TH2238.O59 2000 690'.122 C00-980041-7

© 2000, Société canadienne d'hypothèques et de logement.
Tous droits réservés. La reproduction, le stockage dans un système de recherche documentaire ou la transmission d'un extrait quelconque de cet ouvrage, par quelque procédé que ce soit, tant électronique que mécanique, par photocopie enregistrement ou autre moyen sont interdits sans l'autorisation préalable écrite de la Société canadienne d'hypothèques et de logement.

Imprimé au Canada
Réalisation : SCHL

101-01075/

AVANT-PROPOS

La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL), l'organisme du logement du gouvernement fédéral, a pour mandat d'appliquer la *Loi nationale sur l'habitation*.

Cette loi a pour objet d'aider à améliorer les conditions d'habitation et de vie au Canada. C'est pourquoi la Société s'intéresse à tout ce qui concerne l'habitation, la croissance et le développement urbains.

Aux termes de la partie IX de la Loi, le gouvernement du Canada autorise la SCHL à consacrer des fonds à la recherche sur les aspects sociaux-économiques et techniques du logement et des domaines connexes, et à en publier et à en diffuser les résultats. La SCHL est donc habilitée à faire largement connaître tout renseignement de nature à améliorer les conditions d'habitation et de vie.

La présente publication est l'un des nombreux moyens d'information que produit la SCHL grâce au concours financier du gouvernement fédéral.

REMERCIEMENTS

Nous remercions spécialement plusieurs personnes qui ont fourni des renseignements utiles dans le cadre de la présente enquête.

- Au moment de commencer la présente étude, John Gusdorf préparait un examen de la documentation sur le logiciel WALLDRY et d'autres programmes dans les dossiers de la Société canadienne d'hypothèques et de logement. Il a été en mesure de trouver certains documents et dossiers dont l'auteur ignorait l'existence et qui l'ont aidé considérablement.

- Mike Swinton est le principal concepteur du programme informatique. Il a aussi procédé à sa modification pour fins d'études en laboratoire lorsqu'il s'est joint à l'Institut de recherche en construction (IRC). Or, il possédait une excellente connaissance du programme ainsi que des algorithmes que l'auteur cherchait à comprendre. Il a été en mesure de fournir les réponses qui ont permis la poursuite des travaux.

- Achilles Karagoizis et Kumar Kumaran, de l'IRC, ont fourni des renseignements précieux ainsi que des sources d'information sur les propriétés et le comportement des matériaux.

- M. John Straube, de l'Université de Waterloo, a participé à des discussions utiles sur la ventilation et les mouvements d'air dans les cavités murales.

- Nous remercions également Theresa Weston, de la société Du Pont, pour les renseignements fournis sur les propriétés de certaines des membranes pare-air de sa firme.

- Enfin, Peter Harco, de Hal Industries Inc., a fourni des renseignements sur les propriétés de certains des papiers de construction de sa firme. Il a aussi procédé à une étude parallèle spéciale afin de déterminer la teneur en humidité maximale de ces papiers.

RÉSUMÉ

Une étude paramétrique des systèmes de mur à revêtement en stucco a été entreprise afin d'accroître les connaissances sur l'assèchement provoqué par les systèmes de ventilation des murs extérieurs et de déterminer quels systèmes méritent d'être examinés au cours d'un programme d'essai par le consortium de l'Envelope Drying Rates Analysis (EDRA). Au cours de l'investigation, des questions additionnelles ont été soulevées quant à la façon de mener l'étude, et l'on a procédé à des simulations utiles pour l'orientation du programme d'essai.

Le principal objectif consistait à étudier les paramètres des cavités de ventilation des systèmes de murs revêtus de stucco à l'aide du logiciel WALLDRY élaboré par la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL). On a utilisé un nombre important de combinaisons de profondeur de cavité et de hauteur de jeux de ventilation pour aider le comité directeur de l'EDRA à établir les paramètres finals des travaux de recherche. Voici les conclusions des simulations d'assèchement de murs très humides à l'origine.

1. Le principal facteur touchant le taux d'assèchement est la profondeur de la cavité derrière le stucco. La hauteur du jeu de ventilation ne s'est pas révélée aussi importante pour ce qui est du taux d'élimination de l'humidité.

2. Les cas de stucco découplé (où l'on spécifiait que le stucco était non absorbant) ont fourni la limite inférieure de la solution dans le cadre de l'investigation. Certains types de systèmes de stucco ou de fond ressemblent à ce cas. Les taux d'assèchement étaient plus lents comparativement au stucco directement couplé au mur (c.-à-d. lorsque les propriétés de la face intérieure de la couche de stucco étaient les mêmes que celles de la face extérieure, et qu'il n'existait aucune restriction intentionnelle au mouvement de l'humidité à travers le stucco).

3. Le cas du stucco couplé permettait la ventilation et la diffusion de l'humidité. Lorsque le stucco était posé directement sur le papier de construction et sur le revêtement intermédiaire en bois, seule la diffusion permettait une réduction de l'humidité dans le mur.

4. L'obturation de l'évent supérieur d'un mur de stucco ventilé a ralenti l'assèchement de manière significative. Toutefois, il a été démontré qu'une légère infiltration d'air (p. ex. un jeu de ventilation de 1 mm) donnait une capacité d'assèchement comparable à celle d'une cavité ventilée munie d'évents supérieurs et inférieurs identiques.

5. Du point de vue expérimental, il a été démontré que le taux d'humidité du stucco au début de l'étude pouvait nuire à l'interprétation des taux d'assèchement du mur de bois situé à l'arrière. Cette situation s'explique par le fait que le stucco peut absorber ou rejeter de grandes quantités d'humidité selon son état d'équilibre avant d'être exposé aux conditions du caisson d'essais. Autrement dit, l'évolution pondérale totale d'un mur ne fournit pas toute l'information nécessaire pour décrire la capacité d'assèchement.

6. L'abaissement du taux d'humidité relative (H.R.) dans le caisson d'essais a accéléré l'assèchement des murs d'essai. On a examiné des taux d'humidité relative variant entre 50 et 80 % afin de permettre à l'équipe de l'EDRA de décider s'il s'imposait de modifier les conditions à l'intérieur du caisson d'essais. Une évaluation paramétrique semblable a été effectuée pour la température dans le caisson représentant les conditions extérieures.

7. L'enlèvement du pare-vapeur de polyéthylène a permis un séchage relativement rapide du mur soumis aux conditions simulées. Dans le cas d'une humidification unique attribuable à

la construction, on a conclu que l'humidité présente pourrait être éliminée pendant les travaux pourvu qu'on attende avant d'appliquer la peinture finale. Cependant, l'humidification chronique des murs dépourvus de pare-vapeur de polyéthylène constitue un cas tout à fait différent.

8. Le bardage en vinyle semblait retenir l'humidité dans le revêtement intermédiaire pendant une période de temps sensiblement plus longue que bien des murs de stucco couplé. Ces simulations n'incluaient pas les effets de la ventilation créée par les bandes de départ ou les autres détails d'exécution qu'on retrouve sur les chantiers — des détails qui amélioreraient l'assèchement des murs. On a suggéré qu'une certaine ventilation serait bénéfique dans le cas des murs revêtus de bardage en vinyle. Les mécanismes de pompage reliés à la capacité du vent à faire fléchir le bardage améliorent probablement les capacités d'assèchement du matériau. Il est probablement justifié d'effectuer des recherches sur les caractéristiques des fuites de ces joints.

9. L'assèchement d'un mur revêtu de bardage en bois enduit d'apprêt et de peinture de finition et posé directement sur du papier de construction était faible, comme dans le cas du mur revêtu de bardage en vinyle. En outre, le contact direct avec le mur permettait au bardage d'accumuler de l'humidité. On sait depuis longtemps que cette situation peut causer la dégradation du bardage et empêcher l'assèchement du mur de fond.

10. L'assèchement était adéquat pour le mur revêtu de bardage en bois recouvert d'apprêt et de peinture de finition, posé sur des fourrures et muni d'orifices de ventilation inférieurs et d'orifices de ventilation supérieurs restreints. Cet assemblage permettait aussi de maintenir la teneur en humidité du bois à des niveaux passablement bas.

11. L'élément de contrôle du mouvement d'humidité de tous les tests paramétriques était le revêtement intermédiaire en bois. Les propriétés du panneau de copeaux orientés ont été tirées de la documentation disponible. Plus près de nous, des travaux non publiés ont suggéré que les propriétés des panneaux de copeaux orientés pouvaient varier de manière significative d'un fabricant à l'autre. Par conséquent, le type et la fabrication du revêtement intermédiaire en bois sont des éléments critiques lors du choix de matériaux à utiliser pour les travaux de recherches.

12. Le revêtement intermédiaire en contreplaqué possède une plus grande perméabilité que le panneau de copeaux orientés, compte tenu des valeurs de contrôle disponibles dans la documentation. À cause de la façon dont on avait précisé la teneur initiale en humidité (en termes de poids volumique apparent), il semblait peu approprié de comparer les deux types de données. Toutefois, on a conclu que les murs dont le revêtement intermédiaire était en contreplaqué sécheraient plus rapidement.

13. Dans le même ordre d'idées, la comparaison de l'assèchement des murs à ossature en 2 x 4 (38 x 89 mm) avec les murs à ossature en 2 x 6 (38 x 140 mm) a été compliquée par la différence de volume total de bois d'ossature et par l'humidité totale contenue par le bois pour la même teneur en humidité initiale. Cette comparaison est appropriée lorsqu'on traite de l'humidité attribuable à la construction, puisqu'il a été démontré qu'il fallait dissiper un volume d'eau beaucoup plus grand, que la concentration d'humidité dans le revêtement intermédiaire était plus élevée et que l'humidité mettait plus de temps à se dissiper.

14. La teneur en humidité de l'ossature de bois peut varier rapidement au début de l'expérience : il est donc nécessaire de pouvoir établir les gradients d'humidité initiale dans le bois. On ne s'attend pas à une grande variation de l'humidité entre la partie supérieure et inférieure de l'ossature de bois

du mur. Cependant, on prévoit que l'assèchement sera lent au niveau de la lisse basse. Cet aspect n'a pas été modélisé de façon précise dans la présente étude; toutefois, compte tenu des gradients de température découlant du mouvement d'air derrière le revêtement en stucco, la partie inférieure des murs d'essai séchera plus lentement que la partie supérieure, en vertu des conditions d'essai.

15. Les gradients d'humidité transversaux du revêtement intermédiaire seront élevés. On relèvera aussi des gradients d'humidité verticaux dans le revêtement intermédiaire à cause de la façon dont l'humidité s'échappe par le jeu de ventilation supérieur, le cas échéant.

16. La teneur en humidité et les propriétés d'absorption du stucco auront des influences importantes sur la mesure de poids des murs d'essai. Toute modification des conditions dans le caisson d'essais qui influence l'absorption et la désorption de l'humidité contenue dans le stucco peut masquer les petites variations de teneur en humidité de l'ossature et du revêtement intermédiaire des murs d'essai. Dans ce cas-ci, les tentatives de simuler les effets solaires pourraient assécher les murs plus rapidement mais causer une redistribution de l'humidité encore plus complexe. Il faudrait que cet aspect soit contrôlé adéquatement pour permettre la comparaison avec les simulations par ordinateur et l'attribution des évolutions pondérales appropriées.

17. La simulation d'un vent modéré à l'intérieur du caisson d'essais et dirigé vers les orifices de ventilation inférieurs a accru le refroidissement des portions extérieures des murs d'essai. Cette mesure a ralenti légèrement le taux d'assèchement par ventilation. Tout est fonction des caractéristiques du mouvement d'air dans la cavité de ventilation et des jeux de ventilation utilisés.

Quelques améliorations ont été recommandées pour le modèle. La plus importante a trait à l'examen et à la mise à jour de la base de données sur les propriétés des matériaux. Actuellement, le modèle informatique WALLDRY ne comprend pas le transfert de la masse liquide. Or, l'ajout de cette caractéristique s'impose. La comparaison de l'assèchement prévu avec celui de modèles plus efficaces s'impose aussi.

Bien que les simulations par ordinateur décrites dans le présent rapport correspondent aux préconceptions générales sur le rendement des murs dans différentes conditions, seules les études de vérification permettent d'évaluer les faiblesses d'un modèle et d'améliorer ce dernier. La principale recommandation porte sur l'importance de connaître les propriétés physiques des matériaux employés dans un programme expérimental. La connaissance des conditions limites initiales et des caractéristiques du mouvement d'air provoqué par le système de ventilation des murs est indispensable afin de comprendre le rendement des murs en laboratoire et, par extrapolation, leur comportement lors de conditions climatiques réelles.

TABLE DES MATIÈRES

1 OBJECTIFS 1

2 INTRODUCTION 2

3 PORTÉE LIMITE DES TRAVAUX 3

4 MODIFICATIONS APPORTÉES À WALLDRY 4

5 PLAN DE SIMULATION PROPOSÉ INITIALEMENT 6
Simulation de la poussée thermique en régime permanent 6
Simulation des infiltrations et des exfiltrations en régime permanent 6

6 DÉFINITION DES MURS D'ESSAI ET DES CONDITIONS 8
Teneur en humidité initiale 8
Humidité relative et température intérieures 8
Humidité relative et température extérieures 8
Bois de charpente 9
Isolant 9
Sablières et lisses basses jumelées 9
Face intérieure du mur 9
Revêtement extérieur : panneau de copeaux orientés de 12,5 mm 10
Papier de revêtement intermédiaire et membranes de revêtement 10
Espacement des fourrures 10
Mécanismes relatifs au pesage continu et à la perte d'humidité 10
Stucco 11
Essai à la pression neutre 11
Différence de pression du vent 12

7 CARACTÉRISTIQUES DES INFILTRATIONS D'AIR 13
Caractéristiques du mouvement d'air à l'intérieur de la cavité 13
Caractéristiques des infiltrations d'air par les orifices de ventilation supérieurs et inférieurs 15

8 PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX 18

9 PLAN PARAMÉTRIQUE RÉVISÉ 20

10 RÉSULTATS 23
Murs de stucco découplé 23
Murs de stucco couplé 26
Rendement des murs de référence 40

11 CONCLUSIONS 49

12 SOMMAIRE 52

13 RECOMMANDATIONS POUR LES PROCHAINES ÉTUDES 53

ANNEXES

A : FICHIER ENTRÉE TYPE D'UN MUR A-2
B : FICHIER ENTRÉE TYPE DE DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES B-2
C : BASE DE DONNÉES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX - PROPS.DAT C-2

BIBLIOGRAPHIE 67

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Solution d'Etheridge pour l'équation sur le mouvement d'air par un jeu direct [10] 13
Figure 2. Résistivité de la diffusion en fonction de l'humidité relative de matériaux incorporés à WALLDRY 18
Figure 3. Effet des conditions d'humidité relative dans le caisson sur les taux d'assèchement hebdomadaires en fonction de la profondeur de la cavité de ventilation, pour un jeu de ventilation de 2,5 mm - stucco découplé, temp. = 5 °C 24
Figure 4. Effet de la température du caisson sur les taux d'assèchement hebdomadaires en fonction de la profondeur de la cavité de ventilation, pour un jeu de ventilation de 2,5 mm, stucco découplé, H.R. = 50 % 25
Figure 5. Effet des conditions d'humidité relative dans le caisson -- effet de la profondeur de la cavité de ventilation sur les taux d'assèchement hebdomadaires lorsque le stucco est couplé, jeu de ventilation de 2,5 mm, temp. = 5 °C 28
Figure 6. Variation de poids totale prévue pour le mur S19-12 sous différentes conditions 29
Figure 7. Variation de poids totale prévue pour le mur S38-12 sous différentes conditions 29
Figure 8. Assèchement de chacun des principaux éléments du mur S19-12, orifices de ventilation inférieur et supérieur ouverts de 12 mm, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 31
Figure 9. Assèchement de l'âme et de la paroi du bois d'ossature, orifices de ventilation inférieur et supérieur ouverts, mur S19-12, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 31
Figure 10. Assèchement de la couche intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifices de ventilation inférieur et supérieur ouverts de 12 mm, 70 % d'humidité relative et température de 5°C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 32
Figure 11. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifices de ventilation inférieur et supérieur ouverts de 12 mm, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 32
Figure 12. Assèchement de chacun des principaux éléments du mur S19-12, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % 34
Figure 13. Assèchement de la paroi et de l'âme du bois d'ossature, mur S19-12, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 34
Figure 14. Courbe d'assèchement de la paroi intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 35
Figure 15. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 35
Figure 16. Assèchement de chacun des principaux éléments du mur S19-12, orifice de ventilation supérieur partiellement fermé (1 mm), 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 36
Figure 17. Courbe d'assèchement de la paroi intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifice de ventilation supérieur partiellement ouvert (1 mm), 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 36
Figure 18. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, mouvement d'air partiel par l'orifice de ventilation supérieur (1 mm), 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 37

Figure 19. Assèchement des principaux éléments du mur S19-12, ossature en 2 x 6, 50 % d'humidité relative dans le caisson, revêtement de stucco conditionné à la même humidité relative 39
Figure 20. Accumulation d'humidité dans la couche intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, ossature en 2 x 6, teneur en humidité maximale de 45 % 39
Figure 21. Assèchement de chaque élément principal du mur S19-12, pare-vapeur de polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 41
Figure 22. Assèchement de la paroi et de l'âme du bois d'ossature, mur S19-12, pare-vapeur de polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 41
Figure 23. Courbe d'assèchement de la face intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 42
Figure 24. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dan le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 42
Figure 25. Bardage en vinyle, assèchement de chacun des éléments principaux, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson 43
Figure 26. Assèchement de chacun des principaux éléments du mur S19-12, pare-vapeur de polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative 44
Figure 27. Assèchement de chacun des éléments principaux d'un mur dont le bardage en bois est posé sur des fourrures, cavité de ventilation de 19 mm, orifices de ventilation de 12 mm (inférieur) et de 1 mm (supérieur), 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson 45
Figure 28. Humidité relative de l'air dans la cavité de ventilation, de bas en haut, 70 % d'humidité relative dans le caisson 46
Figure 29. Assèchement de la paroi et de l'âme du bois d'ossature, bardage en bois posé sur des fourrures de 19 mm, orifices de ventilation de 12 mm (inférieur) et de 1 mm (supérieur) 46
Figure 30. Courbe d'assèchement de la face intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, bardage en bois, cavité de ventilation de 19 mm, orifices de ventilation de 12 mm (inférieur) et de 1 mm (supérieur) 47
Figure 31. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, bardage en bois, cavité de ventilation de 19 mm, orifices de ventilation de 12 mm (inférieur) et de 1 mm (supérieur) 47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Plan expérimental original pour l'étude de l'influence de la ventilation sur l'assèchement 6

Tableau 2. Profondeur de la cavité de ventilation par rapport à la hauteur du jeu de ventilation (21 combinaisons) 16

Tableau 3. Coefficient de débit K_2 pour les jeux de ventilation de 1 mm de longueur formés par les solins supérieur et inférieur [Pa/((L/min)/m)²)] 17

Tableau 4. Coefficients de débit K_1 et K_2 de la cavité de ventilation hauteur de l'élément = 0,26667 m largeur de l'élément = 1 m 17

Tableau 5. Effet des paramètres de ventilation et de l'humidité relative dans le caisson sur le taux d'assèchement hebdomadaire (g/m²/semaine) - pression neutre, stucco découplé, caisson à une température de 5 °C 23

Tableau 6. Effet des paramètres de ventilation et de la température dans le caisson sur le taux d'assèchement hebdomadaire (g/m²/semaine) - pression neutre, stucco découplé, H.R. dans le caisson = 50 % 25

Tableau 7. Effet des paramètres de ventilation et de l'humidité relative dans le caisson sur le taux d'assèchement hebdomadaire du bois d'ossature (g/m²/semaine) - pression neutre, stucco couplé, température dans le caisson de 5 °C 27

Tableau 8. Assèchement net du stucco en tant que fonction des caractéristiques des orifices de ventilation et de l'humidité relative dans le caisson (g/m²/semaine) - pression neutre, stucco couplé, température dans le caisson de 5 °C 27

1. OBJECTIFS

L'objectif des présents travaux consistait à évaluer les paramètres d'essai d'une étude que la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) s'apprête à mener dans le cadre du programme d'essai de l'enveloppe des bâtiments à ossature de bois de la région côtière de la C.-B. Le présent rapport donne les résultats détaillés des essais menés en laboratoire en régime permanent, sous des différences au niveau thermique et au niveau de l'humidité relative.

Les objectifs précis sont les suivants :

- examiner les épaisseurs de cavité de ventilation qui méritent d'être évaluées en laboratoire;
- examiner les restrictions au niveau de la ventilation (au haut et au bas du mur) dont l'étude a été proposée dans le plan de recherche de la SCHL et qui ont un effet utile;
- établir le classement relatif des capacités d'assèchement compte tenu d'une température particulière et de données historiques sur l'humidité relative;
- évaluer les effets de l'enlèvement du pare-vapeur sur l'assèchement, aux mêmes conditions.

2. INTRODUCTION

Le programme d'essai original proposé pour la SCHL nécessitait un nombre important de murs d'essai d'un type particulier et dotés de paramètres de ventilation différents (Hazleden, 1997). Lors d'un examen du programme d'essai proposé, il a été recommandé d'utiliser autant que possible la modélisation informatique pour déterminer quels murs il fallait soumettre aux essais visant à confirmer l'approche conceptuelle (DMO Associates, 1997). Il faudra soumettre à une simulation plus de 40 murs d'essai enraison du nombre de combinaisons paramétriques au niveau de l'épaisseur des cavités de ventilation et des différentes restrictions de la ventilation et de l'ajout de murs traditionnels recouverts de vinyle et de bois pour fins de comparaison.

Pour les expériences de laboratoire, il importe de connaître le temps requis pour qu'un assèchement important se produise. Or, la simulation par ordinateur peut fournir une estimation du temps d'assèchement. Cette période se répercute sur la planification et les coûts des expériences de laboratoire. En retour, les résultats des expériences peuvent servir à évaluer la capacité des modèles informatiques de reproduire le comportement des véritables murs d'essai, pourvu que des mesures suffisantes soient prises afin de confirmer les simulations. Comme le classement des murs ne convient qu'aux conditions énoncées, il est probablement nécessaire d'examiner le comportement des murs en fonction de diverses conditions météorologiques pour obtenir une meilleure appréciation à long terme. À peu de choses près, cette démarche ne peut être réalisée, au niveau des prévisions et de la conception, qu'en soumettant les modèles aux conditions météorologiques réelles.

Deux programmes informatiques ont été envisagés pour ce travail : le programme WALLDRY, un modèle élaboré pour le compte de la SCHL, et le programme LATENITE, un modèle plus récent élaboré par l'Institut de recherche en construction (IRC). On considère que le programme WALLDRY n'est pas aussi flexible ou précis que le programme LATENITE. Toutefois, on prévoyait qu'il serait suffisamment précis pour les travaux préliminaires envisagés.

Au moment où la simulation commençait, on dressait les plans pour la poursuite des travaux de recherche. Le projet a été nommé « Envelope Drying Rates Analysis Experiment (EDRA) ». Des fonds de démarrage ont été fournis par la SCHL, et un consortium de partenaires financiers privés et publics a été constitué. Le projet est planifié et exécuté au laboratoire de Forintek Canada Corp., à Vancouver. Pendant les étapes de planification de la méthode d'essai, un nombre important de changements ont été apportés au plan original, sur l'avis du comité directeur et d'un sous-groupe de l'équipe technique. Par conséquent, la portée de la présente analyse paramétrique et le contenu du rapport ont été modifiés afin de répondre à quelques-unes des questions soulevées lors de la planification de l'étude et d'apporter la dernière touche aux paramètres d'essai.

Notons que le programme expérimental prévu sera effectué sur des murs d'essai placés à l'intérieur d'un caisson d'essais conditionné en fonction des conditions extérieures pour ce qui est de l'humidité relative et de la température. Le laboratoire à l'intérieur duquel le caisson d'essais sera construit fournira les conditions intérieures. Bien que ces conditions varient quelque peu, cette situation ne devrait pas influencer beaucoup les résultats compte tenu des données enregistrées au fil du temps.

3. PORTÉE LIMITE DES TRAVAUX

Malgré la clarté des objectifs, il est utile d'établir la portée limite de cette étude paramétrique. Il s'agit des résultats généraux qui seront obtenus, et il importe de garder ce point à l'esprit.

- Le principal objectif consiste à étudier la capacité de ventilation de cavités de différentes largeurs.

- Un seul type précis de construction de mur a été choisi pour la principale étude paramétrique. L'utilisation de différents types de construction se serait traduite par des taux d'assèchement et des capacités de ventilation différents.

- Pour l'étude principale, les propriétés des matériaux ont été fondées sur les données versées dans le logiciel WALLDRY dans les années 80. Certaines propriétés ont été révisées en fonction de la documentation plus récente. Les effets de leur variation ou leur validité ne feront l'objet d'aucune évaluation.

- On a choisi un temps relativement doux pour les conditions météorologiques en laboratoire, ce qui pourrait se solder par une classification relative de l'assèchement des murs inapplicable dans le contexte de conditions mauvaises ou réelles.

- Un mur classé au premier rang pour ce qui est de la capacité d'assèchement pourrait ne pas convenir à l'utilisation estivale d'un climatiseur, à Vancouver.

Afin d'aider à la planification des travaux de recherches, plusieurs paramètres ont été ajoutés à la portée originale. Ils seront décrits davantage plus loin dans le rapport.

À l'origine, on n'envisageait pas de modifier le programme WALLDRY pour accomplir les travaux visés. Ce n'est qu'une fois le projet mis en œuvre et les applications passées examinées que l'on a jugé nécessaire de modifier le modèle afin de l'adapter à des cas particuliers. Les changements ont été incorporés au modèle informatique pour simuler, de façon plus réaliste, le rendement attendu. La portée du projet a donc été modifiée, à cause des coûts élevés des expériences de laboratoire.

On a soulevé de nombreuses questions sur le rendement des murs qu'il serait utile d'aborder au cours de l'analyse paramétrique. Compte tenu de la portée de la présente étude, certaines questions seulement ont pu être ajoutées.

4. MODIFICATIONS APPORTÉES À WALLDRY

La version actuelle de WALLDRY a été livrée à la SCHL par RWDI et Scanada en 1988. Il s'agit d'une version conviviale du modèle de simulation préparé afin de simplifier les propriétés de saisie pour les utilisateurs. Avant la préparation et la diffusion de la version conviviale, il fallait charger manuellement les données d'entrée dans un fichier reconnu et exécuté par la principale plate-forme informatique du modèle. Ce modèle informatique utilise les fichiers de données météorologiques sur une période d'un an préparés par RWDI à partir des bulletins météo préenregistrés d'Environnement Canada pour dix villes réparties dans l'ensemble du pays.

Une deuxième version du modèle WALLDRY a été préparée afin d'étudier le rendement des murs lors d'essais en laboratoire accomplis dans le cadre de l'étude effectuée en 1989 par Morrison Hershfield (1999a et b). Le fichier sur la température en laboratoire comprenait des paramètres permettant l'étude des infiltrations et des exfiltrations d'air. On y a aussi ajouté un fichier d'entrée de conditions d'essai hypothétiques ou réelles en laboratoire. Cette version laboratoire de WALLDRY a servi de fondement aux modifications additionnelles requises dans le cadre de la présente étude. Dans ce rapport, nous continuons de faire référence au programme WALLDRY sans en préciser la version.

La version conviviale de WALLDRY et les versions subséquentes comportent un certain nombre de limites. Un examen récent de l'élaboration de WALLDRY précise ces limites et la façon dont certains chercheurs (Gusdorf, 1998) ont tenté de les surmonter en s'appuyant sur les projets de recherche réalisés dans le passé par la SCHL. Dans le présent rapport, quatre limites seulement sont mentionnées.

- Les modules du programme sont écrits en langage QuickBasic et s'exécutent sur DOS. La taille de ces modules est assez importante et correspond trop à la mémoire de DOS pour permettre toute modification significative du code, de même que l'exécution du programme de compilation.

- Les propriétés de diffusion des matériaux de construction visés ne tiennent pas compte du taux d'humidité courant des matériaux.

- Seul l'isotherme de sorption du bois est intégré au modèle. Tous les matériaux semblables au bois (ou hygroscopiques) sont traités de manière identique.

- On ne tient pas compte du transfert de la masse liquide.

L'examen des rapports de recherche où l'on comparait les prévisions de WALLDRY aux mesures prises lors des essais a démontré clairement que certaines améliorations s'imposaient. Les améliorations envisagées antérieurement lors des diverses études effectuées pour le compte de la SCHL se sont révélées inefficaces ou trop arbitraires. Le programme WALLDRY n'a pas été conçu pour servir d'outil d'analyse scientifique détaillée. Les prévisions contiendront toujours des inexactitudes étant donné l'impossibilité de prévoir toutes les propriétés des matériaux ainsi que toutes leurs interactions.

La taille limite a vite été atteinte lors de la modification du code. Les modules du programme ne pouvaient être compilés à moins d'apporter des modifications mineures seulement. Cependant, il a été possible d'ajouter un code additionnel lorsque le modèle était utilisé en mode interprétatif. Le programme met un peu plus de temps à s'exécuter dans ce mode.

Les modules conviviaux ne pouvaient servir à la création ou à l'adaptation d'un fichier de données d'entrée sans que des changements importants ne soient apportés à chaque sous-module afin de l'adapter au revêtement de stucco. Aux fins de la présente étude, les modifications du fichier

d'entrée ont été apportées manuellement dans chaque cas, et l'on a utilisé, pour l'analyse, le principal module de calcul WALLCALC, tel que modifié pour cette investigation. Dans ce type d'opération, le logiciel WALLDRY perd sa convivialité. Des parties des sous-modules conviviaux sont toujours requises pour la lecture du fichier de données d'entrée et la préparation du module d'entrée WALLDRY.TRS, pour sa lecture et son analyse par WALLCALC. On a jugé que la conversion de WALLDRY de manière à ce qu'il puisse s'exécuter sur un système d'exploitation ayant une capacité de mémoire supérieure dépassait la portée du présent projet.

Une fois la décision prise d'exécuter le programme en mode interprétatif, des algorithmes d'isothermes de sorption ont été élaborés pour un nombre important de matériaux figurant dans la base de données sur les propriétés des matériaux. Ces algorithmes ont été incorporés au sous-programme *Partial Pressure*.

Un nouveau sous-programme, *Update VaporDiff*, a été écrit afin de définir et de mettre à jour les propriétés de diffusion des matériaux pertinents, et de manière à tenir compte de l'influence de la teneur en humidité sur ces propriétés sur une base horaire. Les propriétés de diffusion ont été recalculées sur une base horaire au moyen des teneurs en humidité calculées pour la période horaire courante.

Un nouveau sous-programme, *Moisture Removal*, a été écrit afin de situer et de quantifier l'humidité éliminée du mur ou redistribuée à l'intérieur de celui-ci.

Les propriétés d'un type de stucco ont été ajoutées à la base de données sur les propriétés. Le matériau a été reconnu par le programme, et la résistivité de la diffusion ainsi que les isothermes de sorption pour celui-ci ont été ajoutées aux sous-programmes appropriés.

La version de WALLDRY qui avait été adaptée aux fins de comparaison avec les conditions d'essai en laboratoire pouvait tenir compte des infiltrations et des exfiltrations d'air (Morrison Hershfield, 1991a). Les changements effectués au cours du processus ont touché la capacité du programme de tenir compte des variations de pression du vent sur la face extérieure des murs d'essais (c'est-à-dire sur le côté exposé aux conditions extérieures). La version originale de WALLDRY était conçue de manière à accepter les fichiers de données météorologiques générés à partir des bulletins météo préenregistrés d'Environnement Canada contenant la vitesse et la direction du vent. Pour accepter des simulations des différences de pression du vent sur cette face des murs d'essais, il a été nécessaire d'entrer de nouveau et d'adapter le code machine original, et de fournir des coefficients de pression du vent qui reproduiraient les protocoles expérimentaux visés. Le protocole d'essai de l'EDRA prévoit un mouvement d'air de 1,0 à 2,0 m/s au bas des murs d'essais, et le maintient, autant que possible, d'une différence de pression de 1 Pa entre le haut et le bas des murs. Ces conditions ont été simulées en précisant une vitesse du vent de 1,5 m/s et en incorporant des coefficients de pression du vent dans les fichiers d'entrées de manière à ce que la pression varie de 1 Pa entre le haut et le bas du mur. Cette mesure a permis au programme machine de tenir compte des différences globales de pression à l'intérieur des murs causées par les infiltrations ainsi que les exfiltrations d'air. Dans la présente étude paramétrique, les effets du mouvement d'air sur le mur sont traités comme un sujet distinct.

On considère que la résistivité thermique des matériaux de construction de la base de données est constante, sauf pour ce qui est des changements incorporés au programme. Aucun changement n'a été apporté à ce dernier pour tenir compte de l'influence de la teneur en humidité sur la résistivité thermique des matériaux. Bien qu'elle soit influencée par la teneur en humidité des matériaux, on considérait que la résistivité thermique avait moins de répercussions sur le rendement du modèle que les changements décrits précédemment. Au niveau des propriétés, la diffusivité liquide des matériaux pourrait avoir des répercussions plus importantes. Or, l'ajout de ce facteur au programme dépassait largement la portée du projet en cours.

5. PLAN DE SIMULATION PROPOSÉ INITIALEMENT

Simulation de la poussée thermique en régime permanent

Le plan d'essais de la SCHL proposé à l'origine prévoyait cinq dimensions de cavité (à l'intérieur et à l'extérieur du revêtement intermédiaire), et six jeux de ventilation exprimés en pourcentage de la surface murale. La matrice des essais proposés pour un cas-type de revêtement ventilé figurant au tableau 1 comprend 20 murs. Si l'on ajoute le cas de la ventilation derrière la membrane du revêtement intermédiaire et certains murs de référence (bardage de vinyle et de bois, posé sur des fourrures ou non), on obtient 43 cas.

Tableau 1. Plan expérimental original pour l'étude de l'influence de la ventilation sur l'assèchement

Jeu de ventilation en % de la surface murale	Profondeur de la cavité de ventilation (mm)				
	38	19	12	5	2,5
0	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
0,1	•	•	•	•	•
0,2	•	•	•	•	•
0,4	•	•	•	•	s.o.
0,8	•	•	•	s.o.	s.o.
1,6	•	•	s.o.	s.o.	s.o.
3,2	•	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.

Il est possible de simuler des murs possédant des lames d'air du côté intérieur du revêtement intermédiaire, même si l'on considère impossible, à l'heure actuelle, de prévoir une membrane séparatrice entre la cavité et l'isolant. Le devis peut prévoir la pose d'une membrane au lieu d'un revêtement intermédiaire en bois dans cette partie du mur, et le revêtement intermédiaire en bois qui sert de support au stucco peut être incorporé aux propriétés d'un bardage composé où le stucco est fixé au revêtement intermédiaire. L'avantage potentiel de ce type de cavité réside dans le fait que la perte (ou l'augmentation) d'humidité peut être plus rapide. Dans ce cas-ci, la membrane séparatrice contrôle le taux de perte d'humidité. Toutefois, il existe des difficultés d'ordre pratique au niveau de l'exécution du solin. Cet arrangement mériterait d'être étudié si l'on pouvait en assurer la faisabilité par une sélection novatrice des matériaux. Comme cette condition était jugée moins importante que d'autres, elle n'a pas été retenue dans le cadre de la présente étude.

Simulation des infiltrations et des exfiltrations en régime permanent

Le programme d'essais proposé de la SCHL prévoyait une étude des différences de pression responsables des infiltrations ainsi que des exfiltrations d'air. Cette situation peut servir à étudier le mouillage ou l'assèchement potentiel d'un mur. Le programme d'essais proposé à l'origine prévoyait l'introduction de modes de pression séquentiels pour les infiltrations et les exfiltrations d'air d'une durée égale à l'assèchement obtenu en régime permanent et à une pression neutre. Cependant, les mérites d'une différence de pression positive ou négative d'un côté à l'autre des murs d'essai ont été remis en question en tant que moyen d'évaluer la capacité d'assèchement.

Par conséquent, le plan paramétrique suivi dans cette étude insiste moins sur les modes d'infiltration et d'exfiltration d'air dans le cadre

des principaux objectifs d'essais. Les avantages de ce protocole d'essais n'étaient pas évidents en ce qui concerne les essais menés par Morrison Hershfield (1991a). Pour commencer, l'assèchement était très lent, et les conditions changeaient avant qu'il n'ait suffisamment progressé. Il est peu utile de procéder à une expérience sur le sujet, malgré la faisabilité de la modélisation, à moins de mesurer avec précision les pertes d'humidité. Cet exercice permet, dans une large mesure, de vérifier la capacité d'un modèle. Par contre, d'autres questions méritent d'être étudiées en premier.

Quelles sont les conséquences d'un défaut de construction qui crée un mouvement d'air vers l'intérieur et l'extérieur du mur ainsi qu'une amélioration de l'assèchement? Pour se révéler un ajout efficace à la construction, il faudrait que cette caractéristique se retrouve dans chaque cavité et en dimensions égales. Actuellement, des infiltrations peuvent se produire derrière les plaques de plâtre, au bas de chaque cavité, si le bâtiment n'est pas étanche à l'air (à cause de l'absence d'enveloppe de bâtiment ou de défectuosité de celle-ci). Le contact entre les matériaux n'est pas toujours étanche à cet endroit. On peut s'attendre à un certain soulèvement des clous et des vis et à des infiltrations d'air. Des mesures prises par Forintek sur ce type de contact pourraient servir de source d'information sur les coefficients de débit (Onysko, 1993). Normalement, il ne s'agit pas d'un concept souhaitable à cause du danger d'inversion des infiltrations et de l'accumulation d'humidité dans les murs qui peuvent en résulter.

Avant d'évaluer la fiabilité des infiltrations de cette nature pour assécher les murs humides, il faudrait d'abord évaluer l'assèchement des murs dont les cavités sont ventilées en les exposant aux conditions météorologiques réelles. Ces effets pourraient annuler tout avantage découlant des infiltrations accidentelles causées par des défectuosités ou par des orifices de ventilation aménagés volontairement et dont la direction des infiltrations est incontrôlable en présence de conditions météorologiques types.

6. DÉFINITION DES MURS D'ESSAI ET DES CONDITIONS

Les murs d'essai proposés pour la simulation sont construits avec ce qui suit : ossature conventionnelle aux cavités entièrement remplies d'isolant de fibres de verre, revêtement intermédiaire en bois, membranes et revêtement en stucco ou autre posé sur des fourrures de diverses épaisseurs. Les descriptions suivantes précisent les matériaux qui seront utilisés. On y aborde aussi les questions qui touchent le rendement des murs d'essai et les décisions qui influencent la validité des simulations par ordinateur.

Teneur en humidité initiale

Pour les poteaux et le revêtement intermédiaire en bois, on peut préciser une répartition uniforme de la teneur en humidité (TH) initiale. La TH initiale pour les poteaux de bois suggérée par Hazleden (1997) correspondait à 40 % du poids sec. Ce choix a été en partie influencé par la nécessité d'avoir un niveau d'humidité initial suffisamment élevé dans les matériaux en bois compte tenu du séchage qui se produirait pendant l'installation des instruments et avant le début des essais.

Afin de pallier le problème d'assèchement, l'équipe technique de l'EDRA a décidé d'utiliser une méthode de conditionnement différente. On a procédé à l'humidification en immergeant le bois d'ossature des murs d'essai partiellement finis dans un bain d'eau. Tous les capteurs qui ne risquaient pas d'être endommagés au contact de l'eau étaient installés avant l'immersion. Ce protocole d'immersion a permis d'isoler les murs et de les fermer peu de temps après le conditionnement par l'humidification. On prévoit aussi que les murs d'essai peuvent être exposés aux conditions du caisson d'essais peu de temps après avoir été fermés.

Aux fins de la modélisation et des essais, la teneur en humidité moyenne initiale est de 30 % pour l'ossature, et on suppose que la teneur en humidité est de 35 % à la surface du bois, et de 25 % environ, au centre. Le panneau de copeaux orientés et le contreplaqué du revêtement intermédiaire ne sont pas directement exposés à l'eau lors du conditionnement, et l'on prévoit une teneur en humidité d'environ 25 %. Si la répartition réelle de l'humidité dans les murs d'essais peut varier énormément, il est toutefois possible de l'évaluer au moment de préparer les murs pour les essais. Les données sur la répartition réelle de l'humidité au début de l'essai peuvent être saisies afin de servir à l'analyse finale des divers murs.

Humidité relative et température intérieures

On a proposé une température et une H.R. intérieures en régime permanent de 20 °C et de 40 % respectivement. Il est inutile d'envisager d'autres conditions pour les essais en régime permanent. Le niveau d'humidité relative intérieure choisi importe peu en l'absence d'infiltrations d'air.

Humidité relative et température extérieures

À l'origine, on avait proposé une température et une H.R. extérieures en régime permanent de 5 °C et de 80 % respectivement. Comme le taux d'assèchement est faible pour des conditions de ce genre et que la validation de programmes constitue l'un des principaux objectifs du projet de l'EDRA, on pourrait envisager d'autres conditions d'assèchement. Des analyses informatiques additionnelles ont été effectuées pour des conditions différentes afin d'aider à la planification des conditions finales en caisson du programme d'essai. Ces conditions additionnelles sont énoncées dans l'analyse paramétrique finale décrite au chapitre 9 du présent rapport.

Bois de charpente

À l'origine, le plan de la SCHL prévoyait, pour le bois de charpente en dimension nominale, l'utilisation de 2 x 6 (38 x 140 mm) espacés de 400 mm, soit de 15.75 pouces. Certaines portions du code WALLDRY sont établies à l'interne en assumant un espacement de 406 mm (16 pouces) pour les poteaux. Tout autre espacement requiert une modification du code. Actuellement, le nombre de poteaux réels (en tant que source d'humidité) fait partie des données entrées dans le programme. On suppose que la sablière et la lisse basse sont simples, et seul l'assèchement de l'intérieur de la cavité murale est permis. Autrement dit, on suppose que le mur d'essai fait partie d'une surface plus grande et que les effets aux rives sont les mêmes que pour la partie mise à l'essai. En fait, la présence d'un poteau type aux deux rives ne permet pas de respecter entièrement les conditions limites présumées pour les murs étroits.

Plus près de nous, le plan proposé de la SCHL qui a été incorporé à la proposition de l'EDRA pour être mis en oeuvre par Forintek Canada Corp. prévoit l'utilisation de 2 x 4 (38 x 89 mm) comme bois de charpente de dimension nominale étant donné que cette mesure permet, à des fins expérimentales, de réduire la charge intérieure due à l'humidité et d'augmenter les pertes thermiques. Ces deux conditions accélèrent l'assèchement.

Pour que les simulations fournissent des informations utiles qui nous guideront dans nos travaux de recherches, elles sont accomplies en utilisant du bois de charpente en 2 x 4 (38 x 89 mm). Pour démontrer les effets d'une augmentation de l'isolant dans la cavité murale et de l'accumulation d'humidité, un certain nombre de simulations ont été faites à l'aide de bois de charpente en 2 x 6 (38 x 89 mm).

Isolant

On suppose que la totalité de la cavité a été remplie d'isolant de fibres de verre. Les effets de l'augmentation de l'épaisseur des poteaux (et de l'augmentation de l'isolant) démontrent l'influence de la diminution de la perte thermique sur les capacités d'assèchement.

Sablières et lisses basses jumelées

Aux fins de l'expérience sur l'assèchement des murs, on a proposé l'utilisation de sablières et de lisses basses jumelées. Toutefois, le logiciel WALLDRY ne prévoit l'exposition que d'une sablière et d'une lisse basse simple à l'intérieur de la cavité murale. WALLDRY n'a pas la capacité d'étudier en détail la répartition de l'humidité à l'intérieur de l'ossature, que les sablières et les lisses basses soient simples ou doubles. Les deuxièmes sablières et lisses devraient être isolées des autres afin d'éliminer tout effet d'absorption. De plus, pour que les conditions limites aux côtés s'apparentent aux conditions applicables aux murs de grande dimension, l'humidité ne doit s'infiltrer dans les poteaux de rive (pendant le mouillage des murs aux fins de l'expérience) que par les côtés du bois de charpente faisant face aux cavités murales intérieures.

L'utilisation de sablières et de lisses basses jumelées est associée à la construction d'appartements où une chape de béton est coulée sur le support de revêtement de sol. Normalement, la chape de béton entre en contact avec la lisse basse inférieure, une condition qui ne fait pas l'objet d'une simulation dans la présente étude. Par conséquent, une seule sablière et une seule lisse basse doivent contribuer à l'effet d'absorption dans la cavité murale afin de permettre la comparaison des mesures prises lors des essais avec les prévisions de WALLDRY. Tout le bois d'ossature additionnel requis afin de renforcer le mur et d'en permettre la manutention devra, dans la mesure du possible, être isolé de l'ossature d'essai. Comme l'assèchement de la sablière supérieure et de la lisse basse inférieure sera lent, il est possible que leur effet sur les taux d'assèchement soit faible et que cet aspect se révèle peu important.

Face intérieure du mur

On suppose qu'un pare-vapeur en polyéthylène de 0.006 po a été posé en combinaison avec un revêtement de mur intérieur en plaque de plâtre de 12 mm d'épaisseur. Les faces intérieures des murs utilisés dans le cadre du programme d'essai sont en

contreplaqué de marque Crezon que l'on a peint afin de l'isoler du transfert d'humidité avec les conditions intérieures. Ces conditions ne devraient pas varier d'une manière significative. Le contreplaqué a été utilisé afin de renforcer le mur et de permettre sa manipulation sans que le revêtement de stucco ne se fissure. Cette couche est posée avec des vis : on peut facilement l'enlever afin d'examiner les cavités intérieures du mur d'essai et mouiller de nouveau celui-ci, au besoin.

Comme la face intérieure n'est pas couplée au mouvement de l'humidité dans le mur et que ses propriétés thermiques s'apparentent aux plaques de plâtre, on a présumé, pour les simulations par ordinateur, que le revêtement du mur était en plaque de plâtre. Une des séries de simulations nécessite l'enlèvement du pare-vapeur de polyéthylène afin de permettre le mouvement de l'humidité du mur vers l'air intérieur et l'examen des différents taux d'assèchement obtenus. Cet essai ne fait pas partie du programme de laboratoire actuel, mais la simulation est fournie afin de répondre à certaines des questions soulevées sur cette pratique.

Revêtement extérieur : panneau de copeaux orientés de 12,5 mm

L'équipe de projet de l'EDRA a choisi un fabricant précis de panneaux de copeaux orientés et de contreplaqué pour le programme d'essai. Tous les panneaux utilisés proviennent d'un même lot afin de minimiser les variations des propriétés. Comme les propriétés précises des matériaux choisis ne sont pas connues à cette étape-ci, nous avons retenu les propriétés fournies dans la documentation pour ce qui est des panneaux de copeaux orientés. La présente étude paramétrique propose d'examiner des conditions d'assèchement en utilisant les panneaux de copeaux orientés comme principal revêtement intermédiaire. L'assèchement des murs dont le revêtement intermédiaire est en contreplaqué fait l'objet d'un examen distinct car ils font partie du programme d'essai.

Papier de revêtement intermédiaire et membranes de revêtement

Aux fins de la présente étude paramétrique, on suppose l'utilisation d'une membrane courante, soit deux épaisseurs superposées de papier de construction 30 minutes. Cependant, une autre membrane de revêtement courante est aussi employée pour le projet de l'EDRA : un matériau en polyoléfine filée-liée conçu selon les normes canadiennes. Ce matériau est conforme aux exigences techniques du Centre canadien de matériaux de construction (CCMC) pour ce qui est des pare-air des murs extérieurs des petits immeubles. Les propriétés de ces types de matériaux sont assez bien décrites. Elles ont été entrées dans la base de données du modèle informatique.

Espacement des fourrures

La pratique courante en matière de fourrures lors de la reconstruction des murs extérieurs a consisté à fixer celles-ci vis-à-vis les poteaux afin de bien les ancrer. Aussi, des fourrures intermédiaires sont parfois installées entre les premières, directement contre le revêtement intermédiaire. Cette mesure sert en partie à réduire le soulèvement de la membrane de revêtement. Elle offre aussi un meilleur support au stucco. Ces fourrures intermédiaires réduisent la surface de revêtement intermédiaire pouvant servir à la diffusion de l'humidité contenue à l'intérieur des cavités murales. Aux fins de la présente étude paramétrique et du projet de l'EDRA, on suppose que les fourrures sont fixées vis-à-vis les poteaux, et que leur largeur n'empêche pas le mouvement de l'humidité au travers du revêtement. En pratique, les fourrures en bois absorbent ou désorbent l'humidité, des effets qui ne sont pas modélisés dans le cadre du présent exercice.

Mécanismes relatifs au pesage continu et à la perte d'humidité

Le concept expérimental du programme d'essai prévoit le suivi continu du poids total du mur. Pour que le poids total prévu du mur soit disponible aux fins de comparaison, plusieurs

calculs du changement de poids ont été incorporés au modèle. Comme il était possible que l'humidité s'échappe du mur au travers du stucco par l'espace de ventilation prévu ou par drainage, ces mécanismes additionnels de changement de l'humidité totale ont été calculés sur une base horaire. En ce qui concerne le cas qui nécessite l'enlèvement du pare-vapeur de polyéthylène, l'humidité transférée à l'air intérieur ou reçue de celui-ci est aussi compilée. La redistribution de l'humidité contenue dans le mur vers les couches extérieures sous forme de pellicule d'eau condensée à la surface des matériaux et la redistribution de l'humidité qui s'égoutte par la partie inférieure du mur sont aussi compilées de manière distincte, le cas échéant.

Stucco

On suppose une épaisseur de 21 mm pour le stucco. Plusieurs conditions ont été considérées.

A) Lorsque les variables n'incluent que des paramètres de ventilation de manière à ce que seule la perte d'humidité imputable à la ventilation soit évaluée, on a choisi, pour le stucco, des propriétés très résistantes à l'absorption ou à la désorption d'humidité. Essentiellement, le stucco a été découplé du bilan hydrique, ce qui fournit quelques informations sur les avantages maximums que les cavités de ventilation peuvent fournir à elles seules. Il s'agit là de la limite inférieure de l'assèchement estimatif en présence d'un stucco résistant à l'humidité et d'un fond relativement imperméable.

B) On suppose qu'il y a deux épaisseurs de papier de construction lorsque le stucco est posé directement contre celui-ci. La modélisation prévoit que le stucco est appliqué en trois couches, soit le nombre de couches supposé pour le revêtement dans le programme WALLDRY.

C) Lorsque le stucco est posé sur des fourrures et renforcé avec un treillis métallique déployé, la couche intérieure d'armature pourrait restreindre le transfert d'humidité vers l'intérieur du stucco. Or, il n'existe pas de données à l'heure actuelle pour étayer cette hypothèse. Comme le stucco est pressé contre le treillis et qu'il occupe une partie de l'espace de ventilation intérieur, la surface exposée de stucco qui peut absorber l'humidité est accrue. En l'absence de données d'essai pour ce cas-ci, on a supposé, aux fins des présentes analyses paramétriques, que les propriétés de la face cachée du matériau étaient les mêmes que les propriétés du cas B. Si la face extérieure et la face arrière du stucco diffèrent, l'épaisseur et les propriétés de chaque couche peuvent être précisées individuellement.

Le comportement hygroscopique d'un mur revêtu de stucco sera fonction des propriétés de son armature et de sa finition extérieure. Le bilan hydrique de la cavité de ventilation est régi par l'absorption et la désorption d'humidité à chacune des faces de la cavité de ventilation, et par le taux d'extraction d'humidité par ventilation causé par la poussée thermique et les autres effets de l'échange d'air à l'intérieur de l'espace de ventilation. Le mouvement d'air dépend des caractéristiques des orifices d'admission et d'extraction d'air et de la résistance au mouvement à l'intérieur de l'espace de ventilation même. Pour les cas où le stucco n'est pas découplé du mur, il est nécessaire d'extraire toutes les données sur le débit massique horaire afin de déterminer la quantité d'humidité redistribuée et emmagasinée comparativement à celle qui est perdue par le mur en raison de la ventilation et de la diffusion de la vapeur d'eau.

Essai à la pression neutre

Cette étude focalise sur le comportement des murs à une pression neutre (c'est-à-dire qu'on n'examine pas les différences de pression intérieure et extérieure appliquées intentionnellement). Le pare-vapeur de polyéthylène et le revêtement intermédiaire des murs d'essais se combinent au scellement des rives du mur pour empêcher toute infiltration d'air par les cavités murales. Même si le système de contrôle mécanique du caisson d'essais ne peut

être contrôlé avec précision, aucun mouvement d'air ne traverse le mur.

Au cas où l'on envisagerait d'inclure dans l'étude les infiltrations ainsi que les exfiltrations d'air, la quantité d'air circulant dans le mur d'essai sera contrôlée par la perméabilité à l'air du mur extérieur ainsi que par la taille des ouvertures aménagées dans le revêtement intermédiaire du mur. Comme il est impossible de prévoir cette quantité d'air à l'heure actuelle, sauf pour ce qui est des défauts causés par l'absence de scellement des boîtes électriques, aucune simulation n'est prévue afin d'en illustrer les effets.

Différence de pression du vent

Tel que mentionné plus tôt, le programme informatique a été adapté afin de permettre de simuler la distribution d'une pression du vent précise à l'extérieur du mur d'essai. La vitesse et la direction du vent simulées ont été ajoutées à titre de paramètres d'entrée dans le fichier météorologique du laboratoire. Pour comparer le rendement des murs d'essai avec les conditions de laboratoire réelles ou les conditions d'essai extérieures réelles, il faut contrôler la différence de pression entre le haut et le bas des murs.

En résumé, la discussion susmentionnée sur chacune des caractéristiques pertinentes de la fabrication et de la mise à l'essai des murs englobe une partie du processus décisionnel qui a débouché sur la modification de l'étude de l'EDRA. De plus, cette discussion a établi les décisions qui limitaient la portée de l'étude paramétrique. Le prochain chapitre traite de la façon dont les propriétés de l'espace de ventilation sont déterminées. Fondamentalement, le système de mur étudié possède les caractéristiques suivantes :

- plaque de plâtre de 12,5 mm;
- pare-vapeur en polyéthylène de 0,006 po;
- bois de charpente en 2 x 4 (38 x 89 mm) à espacement de 406 mm;
- isolant de fibres de verre;
- revêtement intermédiaire en panneaux de copeaux orientés de 12,5 mm;
- deux épaisseurs de papier de construction 30 minutes;
- cavité ventilée (variant entre 1 mm et 38 mm avec divers jeux);
- stucco de 21 mm (couplé et découplé);
- conditions intérieures (H.R. de 40 % et température de 20 °C);
- conditions extérieures (H.R. et température variées);
- pression neutre.

On précise les écarts par rapport à ces caractéristiques fondamentales lorsque plusieurs questions additionnelles sont abordées. On suppose que la surface murale totale sert aux simulations (2,98 m^2 ~ 3 m^2). Dans la majeure partie du présent rapport, les taux d'assèchement sont exprimés en kg/m^2/semaine. Le mouvement d'humidité à l'endroit où le revêtement intermédiaire et l'ossature entrent en contact n'a pas été modélisé.

7. CARACTÉRISTIQUES DES INFILTRATIONS D'AIR

Dans le concept expérimental, le taux d'assèchement des murs d'essai en fonction des conditions extérieures (celles du caisson d'essais) est en grande partie contrôlé par le taux de diffusion de l'humidité par la cavité de ventilation extérieure et de dissipation à l'extérieur au moyen d'un échange d'air avec l'extérieur. Cet échange est contrôlé par les effets de la poussée thermique et par le mouvement d'air dans cette cavité, ainsi que par la restriction causée par le solin au haut et au bas de la cavité. Nous examinons la méthode retenue pour définir les propriétés du mouvement d'air étant donné qu'il s'agit d'un aspect crucial de l'étude paramétrique et que les propriétés du mouvement d'air font partie du fichier d'entrée de WALLDRY.

Caractéristiques du mouvement d'air à l'intérieur de la cavité

L'expression de la résistance au mouvement d'air dans une cavité de ventilation peut être fondée sur les travaux de recherches accomplis par Hopkins et Hansford (1974) et par Etheridge (1977).

L'équation suivante a été calculée pour un jeu direct à partir de données expérimentales (Hopkins et Hansford, 1974).

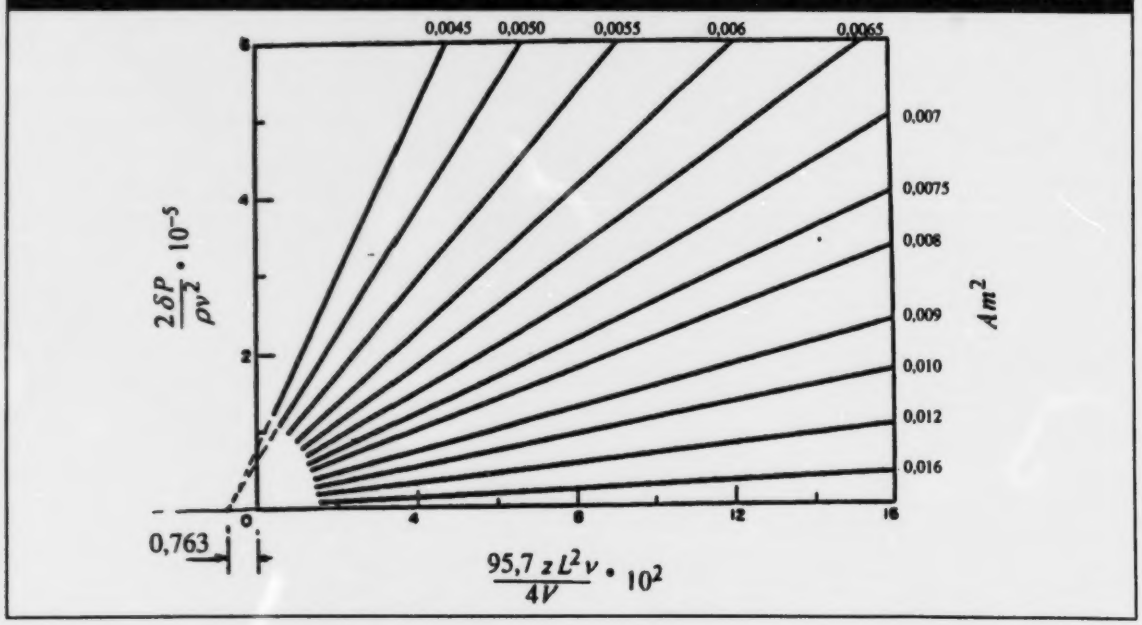
$$1/C^2_z = 95{,}7\ (z/d_h \cdot 1/R_e) + 1{,}50 \qquad [1]$$

où :

C^2_z	=	coefficient de débit
z	=	profondeur de la fissure
d_h	=	4A/(périmètre mouillé) = 2 y
A	=	aire de la fissure
y	=	largeur de la fissure
R_e	=	nombre de Reynolds

Etheridge (1977) a réécrit l'expression précédente sous forme d'équation du troisième degré où entrent en considération l'aire de la fissure (A) ainsi que ses autres propriétés connues, notamment l'information tirée de l'essai sur l'infiltration d'air. Sa solution pour l'équation est montrée à la figure 1.

Figure 1. Solution d'Etheridge pour l'équation sur le mouvement d'air par un jeu direct [10]



Onysko et Jones (1988) ont relevé que la série de lignes pour chaque valeur d'aire de fissure de la figure 1 rayonne d'un point à peu près commun sur l'axe horizontal (à une valeur de 0,763 pour la solution du jeu direct). Comme les aires de mouvement des fissures dans le revêtement et des jeux de faible largeur sont relativement petites, ce point commun a été choisi pour déplacer le centre dont les lignes semblent rayonner en faveur d'une modélisation des aires de jeux de petite dimension. Les erreurs de représentation du mouvement d'air importent moins lorsque les jeux sont relativement grands, surtout à faible pression différentielle.

Le ratio des composantes verticales aux composantes horizontales de chaque ligne rayonnante de la figure 1 devient la tangente de l'angle en terme d'unités de chaque axe. Pour le joint direct, il est possible d'évaluer la tangente (r) à l'aide de l'équation suivante :

$$r = \frac{\frac{2\,\delta P \cdot 10^{-5}}{\rho\, V^2}}{\frac{95{,}7\, Z\, b^2\, \mu}{4\, V} \cdot 100 + 0{,}763} \qquad [2]$$

où :

δP = différence de pression (N m^{-2}/Pa)
ρ = densité de l'air = 1,2 kg/m^3
V = flux voluminique en m^3/s
Z = profondeur du joint en mètres
b = longueur du joint en mètres
F = viscosité cinématique de l'air = 15,7935 •
μ 10^{-6} m^2/s

Onysko et Jones (1988) ont corrélé l'expression susmentionnée ainsi que d'autres expressions pour r dans le cas de jeux à courbure simple et double, avec l'aire de jeu (A = y • b) pour obtenir le rapport suivant :

$$A = 0{,}00458 \cdot r^{-0{,}352} \qquad [3]$$

À la lumière de l'information sur le jeu et les résultats d'un essai d'étanchéité, la substitution mène directement au calcul de l'aire de jeu réelle et de la largeur réelle du jeu. En pratique, certains types de jeux ne peuvent être évalués qu'au moyen d'essais à cause de la rugosité de la surface et des variations des dimensions. D'autre part, il est possible de déterminer les caractéristiques du mouvement d'air dans un jeu hypothétique à surface lisse, compte tenu de l'information sur sa géométrie, sa longueur, sa largeur et sa profondeur.

Après remaniement de l'équation [3] et substitution de l'équation [2] pour r, l'expression peut être formulée de manière à permettre l'entrée dans WALLDRY, selon la présentation prévue, des coefficients des rapports des mouvements d'air. La formule est la suivante :

$$\delta P = K_1 Q + K_2 Q^2 \qquad [4]$$

Si Q = litres/min/m et que V = Q/60 000, l'expression suivante donne, pour le jeu de ventilation y (en mètres) derrière le bardage d'une hauteur d'élément dont la largeur est de b mètres :

$$\delta P = \frac{8{,}5517}{10^9} \frac{Z\, b^2}{(yb)^{2{,}8409}} Q + \frac{2{,}877781}{10^{12}} \frac{1}{(yb)^{2{,}8409}} Q^2 \qquad [5]$$

Le premier terme représente l'écoulement laminaire alors que le deuxième représente l'écoulement turbulent relié à l'admission d'air à l'entrée de la cavité. Il est probable que la cavité de ventilation que nous essayons de modéliser ne possédera des restrictions et des courbures qu'au haut et au bas, alors que le mouvement dans la cavité de ventilation comme telle sera relativement laminaire et dominé par le premier terme. On juge approprié d'utiliser le premier terme pour décrire les caractéristiques du mouvement dans la cavité de ventilation, pour chaque élément vertical du mur, et d'assigner d'autres propriétés pour le jeu supérieur et inférieur.

Burnett et Straube (1995) ont exprimé comme suit l'écoulement laminaire à l'intérieur de la cavité :

$$\delta P = \frac{Z\, q}{4\,610\, \gamma\, b\, y^3} \qquad [6]$$

Ainsi, γ est un facteur d'obstruction des cavités dans les murs de maçonnerie, et *q* correspond au mouvement d'air en m^3/s. Dans la présente étude,

γ servira d'unité. Dans le cas d'obstructions reliées aux caractéristiques des espaceurs ou de la surface des matériaux à l'intérieur de la cavité de ventilation, il faudra évaluer expérimentalement les coefficients étant donné que ces caractéristiques peuvent créer un écoulement turbulent sur toute la hauteur du mur.

Pour collationner ces deux expressions, on a établi que $q = Q = 500$ L/min = 0,00833 m³/s, b = 1 m, γ = 0,0048 m, et que Z = 1 m, que la valeur du premier terme de l'équation [4] est de 16,53 Pa, et que la valeur de l'équation [5] est de 16,34 Pa. Les valeurs relatives divergent au niveau supérieur et inférieur de ces données à cause de la différence entre les exposants des deux expressions. Le courant d'air laminaire à l'intérieur des cavités de murs recouverts de stucco et dont les fourrures sont rapprochées peut être plus facile à modéliser à l'aide de l'expression [4] à cause de l'influence non linéaire de la largeur de cavité b au fur et à mesure que l'espacement entre les fourrures diminue.

Caractéristiques des infiltrations d'air par les orifices de ventilation supérieurs et inférieurs

La modélisation des caractéristiques du mouvement d'air par les ouvertures partielles supérieures et inférieures de la cavité de ventilation peut être accomplie au moyen d'expressions dérivées d'Etheridge pour les jeux à courbure simple et double qui correspondent à l'équation [4]. Toutefois, il est plus simple d'utiliser des équations fondées sur les expériences en conception effectuées en Europe et résumées par Burnett et Straube (1995). Cette démarche simplifie aussi la détermination des cas paramétriques à aborder dans le cadre de la présente investigation.

La pression différentielle (δP) au niveau de la bavette du solin posé au haut et au bas de la cavité de ventilation peut s'exprimer comme suit :

$$\delta P = 0{,}6\ \varepsilon \left(\frac{q}{by}\right) \qquad [7]$$

où

ε = 0,5 pour l'entrée directe dans une cavité
= 0,88 pour la sortie directe d'une cavité
= 0,885 $(b_1/b_0)^{-0,86}$ pour une courbure rectangulaire ($b_0 < b_1$)

et que

b_0 = profondeur du jeu d'admission
b_1 = profondeur de la cavité = y

Par conséquent, le modèle de la différence de pression au niveau du solin inférieur pour l'entrée d'air au bas de la cavité de ventilation correspond à la somme des coefficients d'admission et de courbure rectangulaire dans la cavité de ventilation (pour une unité de largeur de mur, b = 1) :

$$\delta P = 0{,}6\ [0{,}5 + 0{,}885\ (\frac{b_1}{b_0})^{-0,86}]\ (\frac{Q}{60\,000\ bb_0})^2 = \frac{0{,}5 + 0{,}885\ (\frac{y}{b_0})^{-0,86}}{6\ x\ 10^9\ b_0^2}\ Q^2 \qquad [8]$$

L'expression est la suivante dans le cas d'une unité de longueur de solin située au haut du mur :

$$\delta P = 0{,}6\ [0{,}88 + 0{,}885\ (b_1 b_0)^{-0,86}]\ (\frac{Q}{60\,000\ bb_0})^2 = \frac{0{,}88 + 0{,}885\ (\frac{y}{b_0})^{-0,86}}{6 \cdot 10^9\ b_0^2}\ Q^2 \qquad [9]$$

L'écoulement laminaire de la cavité de ventilation par la courbure rectangulaire située au haut du mur ne comprend pas de coefficient d'admission. À cet effet, seuls les coefficients de courbure et de sortie doivent être utilisés. En pratique, il est impossible de prédire si l'air entrera par le solin ou en sortira lorsqu'un mur est exposé au vent. Toutefois, on pense qu'il est plus plausible que l'air entre par le bas pour ressortir par le haut. Pour ces équations, on emploie Q dont les unités sont en L/min parce qu'il s'agit des unités des coefficients K_1 et K_2 reconnus actuellement par WALLDRY. À l'intérieur du programme, les coefficients sont modifiés afin que le mouvement soit déterminé en m³/s. On a décidé de laisser le code machine intact, en partie parce que les essais sur les joints et les coefficients de débit seront probablement effectués à l'aide de ces unités (L/min). Cette décision a aussi permis de

poursuivre l'utilisation des fichiers de données d'entrée avec le programme modifié.

Le lecteur notera que les expressions [8] et [9] ne fournissent que les coefficients K_2 pour l'écoulement turbulent au solin d'entrée et de sortie de la cavité de ventilation. Les coefficients K_1 de ces joints peuvent être positionnés à zéro sans entraîner d'erreur de division par zéro. Dans le cas des fentes ou des jeux longitudinaux, on peut s'attendre à un certain écoulement laminaire et à ce que la valeur de K_1 soit autre que zéro. Pour nous rapprocher de cet objectif, nous avons rendu K_1 égal à K_2, ce qui s'est soldé par un changement très léger de la perte d'humidité par ventilation (< 0,04 %).

En ce qui concerne les caractéristiques de la cavité de ventilation, elle se comportera probablement comme une cavité unique pleine hauteur. Aux fins d'analyse, la cavité est traitée comme s'il s'agissait de neuf éléments verticaux distincts dont le coefficient de débit laminaire est précisé pour chaque élément de hauteur Z.

Les restrictions réelles du mouvement d'air dépendent du concept de solin choisi, une variable que seuls des essais sur les concepts finals peuvent déterminer. Définir ces coefficients de débit avec davantage de précision n'est pas particulièrement important dans le cadre de la présente analyse paramétrique. Toutefois, cette question devrait faire partie du plan expérimental pour ce qui est des fentes de ventilation incorporées à la construction des murs d'essai.

La profondeur de la cavité de ventilation a varié entre 1 mm et 38 mm selon la matrice d'essais fournie au tableau 2. On suppose que le mur a 2,44 m de hauteur, et qu'il est divisé en neuf éléments de 0,2667 m de hauteur chacun. Les coefficients de l'accès inférieur à la cavité de ventilation, de la sortie supérieure de la cavité de ventilation et le coefficient de débit laminaire pour chaque élément vertical sont fournis aux tableaux 3 et 4, compte tenu des équations susmentionnées. Le fait de permettre aux valeurs b_0 d'adopter la même fourchette que les profondeurs de cavité simplifie l'établissement des coefficients de débit des diverses restrictions et nous évite d'avoir à préciser la hauteur des jeux en tant que pourcentage d'aire de mur.

Enfin, le revêtement de stucco est traité comme un pare-air continu, même s'il se fissurera éventuellement, ce qui permettra des fuites entre l'espace de ventilation et l'air extérieur. Les joints horizontaux entre les éléments verticaux de la

Tableau 2. Profondeur de la cavité de ventilation par rapport à la hauteur du jeu de ventilation (21 combinaisons)

Hauteur du jeu de ventilation (mm)	Profondeur de la cavité de ventilation (mm)					
	38	19	12	5	2,5	1
1	*	*	*	*	*	*
2,5	*	*	*	*	*	s.o.
5,0	*	*	*	*	s.o.	s.o.
12,0	*	*	*	s.o.	s.o.	s.o.
19,0	*	*	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
38,0	*	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.

Remarque :
s.o. signifie que la combinaison ne s'appliquait pas.

formule WALLDRY deviennent des joints virtuels. Les coefficients de débit de ces jeux intermédiaires virtuels ne peuvent être fixés à zéro parce que la solution itérative du mouvement d'air nécessiterait une division par zéro. Plutôt, les coefficients de ces jeux ont été établis assez haut pour que dans la solution, le mouvement virtuel par ces joints soit au moins 106 fois plus petit que le mouvement par les jeux réels ménagés au haut et au bas de la cavité de ventilation. On trouvera à l'annexe A un fichier entrée type pour un des murs de la présente série et, à l'annexe B, un exemple type d'un fichier de données météorologiques tronqué.

Tableau 3. Coefficient de debit K_2 pour les jeux de ventilation de 1 mm de longueur formes par les solins supérieur et inférieur [Pa/((L/min)/m)²)]

Hauteur du jeu (m)	Profondeur de la cavité de ventilation (m)					
	0,038	0,019	0,012	0,005	0,0025	0,001
Solin inférieur						
0,001	8,9793E-05	9,5057E-05	1,0074E-04	1,2029E-04	1,5041E-04	2,3083.E-04
0,0025	1,5606E-05	1,7458E-05	1,9457E-05	2,6336E-05	3,6933E-05	
0,005	4,3646E-06	5,2050E-06	6,1122E-06	9,2333E-06		
0,012	9,5882E-07	1,2686E-06	1,6030E-06			
0,019	4,5595E-07	6,3943E-07				
0,038	1,5986E-07					
Solin supérieur						
0,001	1,5313E-04	1,5839E-04	1,6407E-04	1,8362E-04	2,1374E-04	2,9417E-04
0,0025	2,5739E-05	2,7592E-05	2,9591E-05	3,6469E-05	4,7067E-05	
0,005	6,8979E-06	7,7384E-06	8,6456E-06	1,1767E-05		
0,012	1,3986E-06	1,7084E-06	2,0428E-06			
0,019	6,3139E-07	8,1487E-07				
0,038	2,0372E-07					

Tableau 4. Coefficients de debit K_1 et K_2 de la cavité de ventilation hauteur de l'élément = 0.26667 m largeur de l'élément = 1 m

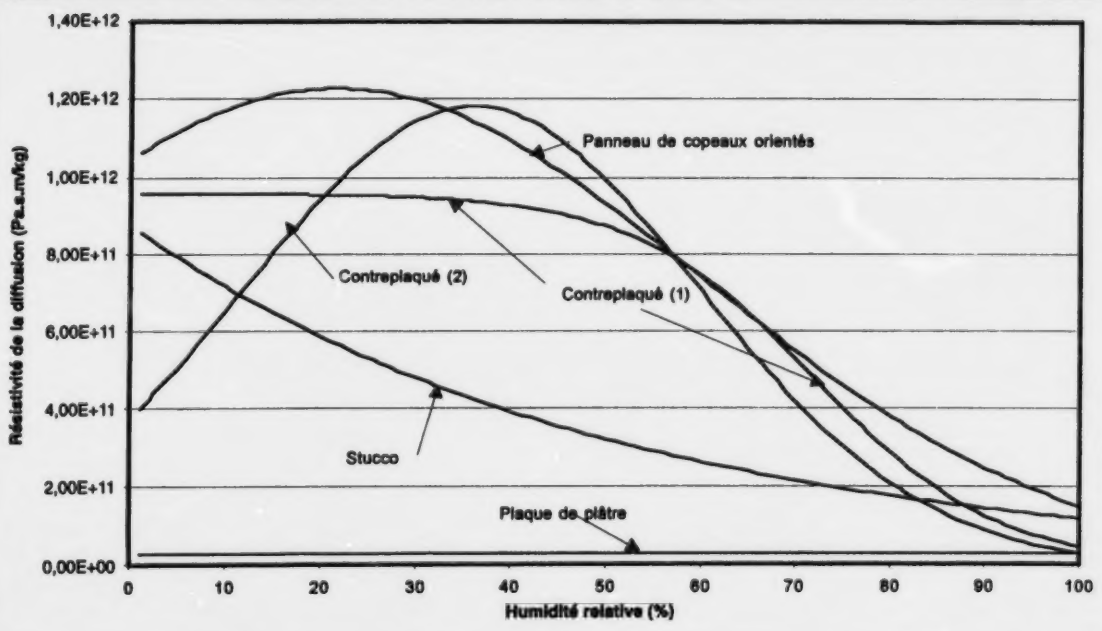
Profondeur de la cavité de ventilation y (m)	K_1 Pa/(L/min)/m	K_2 Pa/((L/min/m²)
0,0010	7,5984E-01	9,5897E-04
0,0025	5,6262E-02	7,1007E-05
0,0050	7,8527E-03	9,9106E-06
0,0120	6,5294E-04	8,2406E-07
0,0190	1,7697E-04	2,2335E-07
0,0380	2,4701E-05	3,1174E-08

8. PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

La documentation des changements apportés à WALLDRY dépasse la portée du présent rapport. Les propriétés des matériaux figurant actuellement dans la base de données fixe se trouvent à l'annexe C. Dans le cas des matériaux dont les propriétés de diffusion sont influencées par la teneur en humidité, certaines données disponibles dans la documentation ont fait l'objet d'expressions, et les algorithmes ont été incorporés au programme. Certaines propriétés ont été étayées de données recueillies lors de discussions avec les chercheurs de l'IRC. Dans ce chapitre, on ne décrit que quelques-uns des rapports découlant de ces démarches et utilisés pour fins d'analyse dans le présent document. Une représentation graphique de la résistivité de la diffusion (l'inverse de la perméabilité à la vapeur d'eau) de certains matériaux est fournie à la figure 2.

Il existe peu de données cohérentes disponibles sur les propriétés de la plupart des matériaux de construction offerts sur le marché. Les données sur les propriétés du contreplaqué ont été obtenues de McLean et al. (1990). La source de matériaux était un contreplaqué extérieur fabriqué de cinq plis de bois Morranti de la Malaisie. On en retrouve la représentation graphique à la figure 2, avec la courbe Contreplaqué (1).
Un autre rapport pour le contreplaqué a été extrait de MOIST Release 2.0 (Burch et Thomas 1993, tel que mentionné dans McLean et al., 1990). La représentation graphique de ce rapport est fournie à la figure 2 avec la courbe Contreplaqué (2).
La plus faible résistivité de la diffusion des valeurs d'humidité relative qui sont basses n'est pas valide pour la courbe Contreplaqué (2) : elle constitue tout au plus un artéfact de l'équation tirée de cette référence qu'on a ajusté à une courbe des données sur la perméabilité à la vapeur d'eau.

Figure 2. Résistivité de la diffusion en fonction de l'humidité relative de matériaux incorporés à WALLDRY



La relation de la perméabilité à la vapeur d'eau du panneau de copeaux orientés a été obtenue de Burch et Thomas (1993). L'inverse est aussi représenté graphiquement à la figure 2. Encore une fois, on relève une bosse dans la représentation graphique de la résistivité de la diffusion qui est invalide en deçà d'un taux d'humidité relative d'environ 40 %, à cause de la forme de la relation ajustée à la fourchette de données valides. Plus près de nous, l'IRC a terminé ses travaux sur une gamme de panneaux de copeaux orientés commerciaux, sauf que les résultats n'étaient pas disponibles au moment de réaliser la présente étude paramétrique.

Pour le stucco, nous sommes encore une fois confrontés à un manque de données. La relation représentée graphiquement à la figure 2 a été obtenue par l'auteur en ajustant une relation logarithmique à certaines données d'essai fournies par l'IRC. La dispersion des données sur la perméabilité à la vapeur d'eau variait beaucoup, quel que soit le type ou l'origine du stucco. La relation illustrée a été obtenue en ignorant les résultats de perméabilité très élevée. En fait, cette représentation graphique passe au travers de la médiane du matériau le plus résistant et représente une relation conservatrice dans le cas de la rétention de l'humidité à l'intérieur du mur.

Burch et Thomas (1993) fournissent l'une des valeurs de la résistivité de la diffusion des plaques de plâtre (1,5748E+10 Pa.s.m/kg). Les autres valeurs fournies dans la documentation, p. ex. Galbraith et McLean (1990), comprennent 3,06E+10 Pa.s.m/kg. Bien que plus élevée, cette valeur reste plutôt faible comparativement aux autres matériaux de construction. Comme la résistance au mouvement de la vapeur est accrue par la peinture utilisée pour la finition de la plaque de plâtre, on a jugé qu'une seule valeur suffirait comme exemple. Dans le cas qui nous intéresse, on a choisi 3,06E+10 Pa.s.m/kg pour servir d'illustration.

Pour la polyoléfine filée-liée, une valeur fixe de 4,44E+12 Pa.s.m/kg a été appliquée à tous les taux d'humidité relative, compte tenu d'une perméance de 1 500 ng/Pa.s.m^2 et d'une épaisseur supposée de 0,00015 m. Pour le papier de construction 30 minutes, une valeur de 4,76E+12 Pa.s.m/kg a été utilisée pour les taux d'humidité relative inférieurs à 50 %. Pour les taux d'humidité relative se situant entre 50 et 100 %, on a supposé que la valeur déclinait linéairement à partir de la valeur mentionnée précédemment pour se fixer à 3,45E+12 Pa.s.m/kg à son point le plus bas. Ces données étaient fondées sur un essai de perméance effectué sur du papier de construction d'une épaisseur supposée de 0,0005 m.

9. PLAN PARAMÉTRIQUE RÉVISÉ

À la lumière des sujets abordés dans les chapitres précédents, cette analyse paramétrique est structurée autour de questions précises qui débordent le cadre des objectifs énoncés. Elle est aussi fondée sur les choix pris relativement à la construction des murs.

Un très grand nombre de simulations serait nécessaire si toutes les variables étaient étudiées de manière égale. Dans certains cas, les premiers essais ont démontré que les conditions d'élimination de l'humidité en régime permanent étaient rapidement établies. Il était donc logique, par la suite, de comparer les taux relatifs de perte d'humidité des murs en fonction des caractéristiques de ventilation plutôt que de tenter de déterminer combien de temps il faudrait à chaque mur pour s'assécher et retrouver un niveau « sûr » d'humidité. Les conditions d'humidité initiales sont quelque peu arbitraires, et le temps d'assèchement, bien qu'utile dans le résumé, n'est rien de plus qu'une indication des taux d'assèchement relatifs. La différence de temps entre une simulation d'une durée d'une semaine et une simulation d'une durée de cinq mois était importante, compte tenu, surtout, de la similarité des résultats essentiels. La sélection de périodes courtes a surtout permis d'augmenter le nombre de simulations afin de trouver une réponse aux questions posées. On a aussi procédé à un petit nombre d'essais d'une durée de cinq mois afin de démontrer le taux de perte d'humidité de différents éléments.

En bref, 21 combinaisons primaires de jeux de ventilation et de profondeur de cavité ont été utilisées pour les principales questions posées dans le cadre de la présente analyse paramétrique. On a donné des dimensions égales aux orifices de ventilation supérieurs et inférieurs dans la plupart des simulations afin de permettre un degré de ventilation maximal. En réalité, un échange d'air trop élevé dans la cavité de ventilation comporte des inconvénients. En pratique courante, il est normal d'aménager un orifice de ventilation et de drainage assez grand au bas de la cavité de ventilation, ainsi qu'une colonne d'air essentiellement fermée au haut. Cette possibilité est aussi abordée dans l'étude. Le lecteur trouvera au tableau 2 les 21 combinaisons de dimensions pour les cavités et les jeux de ventilation.

Question 1 : Dans le cas du stucco découplé, quelle est l'influence de la profondeur de la cavité de ventilation et des dimensions du jeu de ventilation?
Le stucco a été découplé du rendement du mur afin que l'humidité ne puisse s'échapper de ce dernier que par mouvement de l'air par les jeux de ventilation supérieurs et inférieurs de la cavité de ventilation. On a découplé le stucco en précisant qu'il devait être imperméable au mouvement d'humidité (c.-à-d. qu'il ne devait pas absorber ou transmettre d'humidité). Les propriétés thermiques sont demeurées inchangées. Les premières heures d'une simulation sont influencées par la teneur en humidité initiale précisée pour les divers matériaux, notamment les plaques de plâtre qui ne contribuent pas, à toutes fins utiles, à l'évacuation de l'humidité contenue dans le mur, mais qui font partie de sa masse totale. Pour éviter d'inclure cette redistribution initiale et cette période d'acclimatation, on a ignoré l'assèchement qui s'est produit le premier jour lors du calcul initial du taux d'assèchement hebdomadaire. Les essais de simulation de courte durée portaient sur huit jours de séchage. Pour le caisson d'essais, on a choisi les conditions suivantes : 5 °C à 70 % d'humidité relative.

Question 2 : Dans le cas du stucco découplé, quelle est l'influence du taux d'humidité relative dans le caisson sur les taux d'assèchement?
Le taux d'humidité relative actuel choisi par l'équipe de l'EDRA pour le caisson d'essais afin de représenter les conditions extérieures est de 70 %. Cependant, certains ont suggéré qu'une

réduction du taux d'humidité relative dans le caisson provoquerait une augmentation du taux d'assèchement sans invalider la capacité, dans le cadre de l'expérience, d'étudier l'assèchement d'un mur et de fournir des résultats pour la validation des modèles informatiques. Par conséquent, des simulations du type susmentionné ont aussi été accomplies à des taux d'humidité relative de 50, 60 et 80 %. Essentiellement, les essais reliés à la question 1 et les présents essais forment un groupe de référence à l'intérieur duquel l'humidité relative varie entre 50 et 80 %. Au total, 84 simulations ont été requises.

Question 3 : Dans le cas du stucco découplé, quelle est l'influence de la température du caisson d'essais sur les taux d'assèchement?

La sélection d'une température différente pour le caisson d'essais influence la poussée thermique dans un mur, laquelle réduit la différence de pression de la vapeur tout en augmentant la capacité de l'air présent dans le caisson d'essais d'absorber et d'éliminer l'humidité du mur par la cavité de ventilation. Toutefois, la diminution des différentiels thermiques entre l'air intérieur et extérieur réduit la poussée thermique de l'air dans la cavité de ventilation, ce qui, en retour, réduit son débit. La réponse à cette question a été obtenue en conservant l'humidité relative dans le caisson d'essais à 50 %, et en permettant à la température dans celui-ci de varier entre 5 °C et 20 °C, en unités d'accroissement de 5 °C. Cette mesure a nécessité 63 simulations additionnelles d'une durée de huit jours.

Question 4 : Quelle est l'influence du taux d'humidité relative à l'intérieur du caisson d'essais sur les taux d'assèchement des murs revêtus de stucco couplé? Quelle quantité d'humidité s'échappe par diffusion comparativement à la ventilation?

Ces questions sont reliées à la question qui porte sur le stucco découplé. Elles sont pertinentes dans la mesure où le pesage des murs permet d'évaluer de manière suffisamment précise la perte totale d'humidité. L'information permet aussi d'évaluer la façon dont les murs couplés s'assèchent, en particulier en l'absence de ventilation. Pour obtenir un aperçu des réponses à ces questions, il a fallu procéder à 84 simulations additionnelles d'une durée de huit jours afin de mettre en parallèle ces informations avec celles des cas de stucco découplé.

Question 5 : Quelles difficultés rencontrera-t-on pour ce qui est de distinguer la perte d'humidité réelle des éléments de bois contenus dans le mur de la redistribution de l'humidité pendant les expériences sur l'assèchement?

Bien que des expériences permettent d'obtenir des mesures précises des changements de masse totale d'un mur pendant une étude sur l'assèchement, la question demeure quant à l'importance des erreurs qui découlent de l'utilisation de cette information pour faire des suppositions sur l'assèchement. Cette question est abordée en examinant les résultats d'un nombre limité de simulations.

Question 6 : Quelle est la distribution de la perte d'humidité dans les murs, et quels sont les gradients d'humidité des différents éléments des murs?

Trouver une réponse à cette question pour tous les paramètres d'essai serait coûteux. On a plutôt choisi d'illustrer la façon dont l'humidité est redistribuée et perdue pour un mur revêtu de stucco couplé. À cet effet, on a choisi le mur S19-12 (cavité de ventilation de 19 mm, jeux de ventilation supérieur et inférieur de 12 mm).

Question 7 : Quelle est la distribution de la perte d'humidité à l'intérieur des murs lorsque le jeu de ventilation supérieur est fermé?

Il est de pratique courante de ne pas ventiler délibérément le haut d'un espace de ventilation aménagé derrière le revêtement de stucco. Il en résulte une colonne d'air stagnante qui permet le drainage par les ouvertures du bas, mais qui décourage la ventilation. Parallèlement, on ne croit pas que la cavité soit entièrement bloquée. Le décalage entre les matériaux, les joints entre les fourrures, les fissures dans le stucco et même le soulèvement des clous dans les attaches qui maintiennent le lattis sur les fourrures peuvent

permettre de petites fuites d'air. Pour illustrer ce concept, on a montré les effets d'une fuite par un jeu de 1 mm.

Question 8 : Quel effet a un vent simulé sur les taux d'assèchement?
Tel que mentionné au chapitre 4, le programme WALLDRY a été modifié pour accepter une vitesse et une direction du vent précises (1,5 m/s), avec une variation précise des coefficients de pression du vent. On a examiné, entre autres, le cas précis du mur S19-05 (cavité de ventilation de 19 mm de profondeur, jeux de ventilation supérieur et inférieur d'une hauteur de 5 mm). Des simulations d'une durée de cinq mois ont été effectuées avec et sans l'application de la pression du vent au niveau du jeu de ventilation inférieur. Pour accélérer l'assèchement et accentuer le changement, on a choisi, pour les conditions en caisson d'essais, une température de 5 °C et une humidité relative de 50 % plutôt que de 70 %.

Question 9 : Compte tenu des propriétés entrées dans WALLDRY, quelle est la différence de taux d'assèchement lorsqu'on utilise du contreplaqué au lieu d'un panneau de copeaux orientés?
Pour illustrer cet aspect, on a choisi le même mur d'essai (S19-12) qu'à la question 6, et les conditions suivantes pour le caisson d'essais : 5 °C et 70 % d'humidité relative. Une simulation d'une durée de cinq mois est utilisée.

Question 10 : Quel effet obtient-on en utilisant une ossature en 2 x 6 au lieu d'une ossature en 2 x 4?
Bien que cette question semble valable, la comparaison est trompeuse. Si la profondeur accrue de l'ossature se traduit par un plus grand refroidissement des éléments extérieurs du mur, les conditions initiales précisées provoqueront une distribution d'humidité égale à celle des murs d'ossature en 2 x 4 (38 x 89 mm). Cependant, ces données signifient aussi, parce que le mur d'ossature est plus profond, qu'il y a 57 % plus de matériel et 57 % plus d'humidité à dissiper par rapport à une même teneur en humidité supposée initialement dans les parois et l'âme des matériaux d'ossature. À la lumière de ces caractéristiques, la comparaison devrait être de peu d'utilité sauf pour ce qui est du maintien, pendant des périodes accrues, de teneurs en humidité beaucoup plus élevées. Aucune des simulations d'assèchement n'a été prolongée au point d'atteindre des conditions « sûres ».

Question 11 : Quels sont les taux d'assèchement en l'absence de pare-vapeur en polyéthylène?
On a suggéré que les murs s'asséchaient lentement à cause du pare-vapeur. La présente étude paramétrique ne vise pas à nous engager dans la controverse sur la pertinence du pare-vapeur en polyéthylène, mais à fournir un exemple de ce qui arrive en l'absence de ce composant. Aux fins d'évaluation, nous avons opté pour le cas le plus défavorable, lequel serait comparable aux essais précédents. Pour ce cas, on a choisi le mur d'essai S19-12 dont l'orifice de ventilation supérieur a été complètement obstrué. La situation s'aggrave lorsque le stucco est posé directement sur le papier de revêtement intermédiaire et le mur. Toutefois, le cas retenu suffit, à titre d'exemple, à décrire l'ordre de grandeur des effets.

Question 12 : Quel est le taux d'assèchement de deux murs de référence construits à l'aide de bardage en vinyle et en bois et que l'on soumet à la même charge due à l'humidité que dans la présente étude paramétrique?
Les fichiers d'entrée utilisés pour ces essais ont été préparés dans les années 80. À l'époque, les caractéristiques des infiltrations d'air par le bardage en vinyle, les joints du bardage en bois et la cavité située derrière le bardage avaient été établies au moyen d'essais au point fixe. Aucun changement n'a été apporté à cette information. Cependant, tous les autres matériaux ont été choisis de manière à correspondre aux murs revêtus de stucco. On n'a supposé la présence que d'une seule épaisseur de papier de construction.

10. RÉSULTATS

Murs de stucco découplé

Le découplage du stucco de l'assèchement des murs visait deux buts. D'abord, il fallait que la durée des simulations soit relativement courte. Ensuite, il fallait fournir une solution se situant à la limite inférieure, ce qui représente la situation réelle pour certains systèmes de revêtement en stucco existants et proposés.

Questions 1 et 2 : Quelle est l'influence de la profondeur de la cavité de ventilation et des dimensions du jeu de ventilation sur le taux d'assèchement par rapport au taux d'humidité relative dans le caisson?

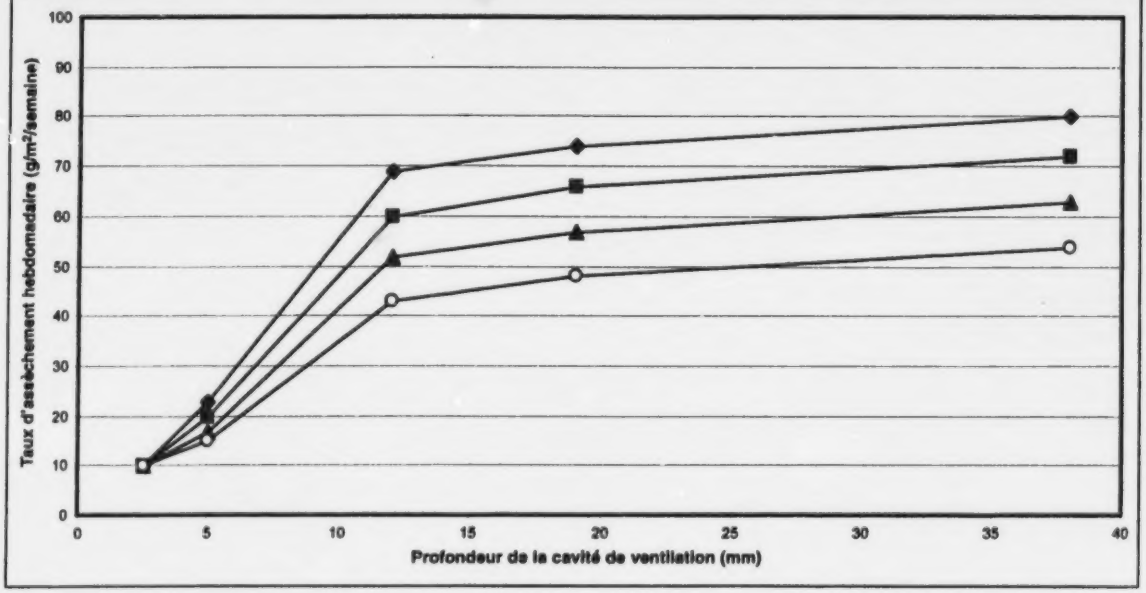
Les résultats des 84 simulations visant à répondre à cette question sont fournis au le tableau 5. On y a résumé les taux d'assèchement hebdomadaires initiaux pour toutes les combinaisons d'orifice et d'espace de ventilation et pour quatre différents taux d'humidité relative à l'intérieur du caisson, soit 50 %, 60 %, 70 % et 80 %.

Il ressort du tableau 5 que la fluctuation du taux d'assèchement dépend davantage de la profondeur de la cavité de ventilation que de la hauteur de l'orifice de ventilation. Il existe des différences subtiles de gradient de température dans la colonne d'air. La poussée thermique et la capacité de la partie intérieure du mur d'absorber l'humidité sont influencées par ces éléments. Toutefois, les effets nets sont clairs. Les effets de l'humidité relative dans le caisson d'essais sont clairs, eux aussi. Plus le taux d'humidité relative est faible et plus l'air captera l'humidité dans la cavité, ce qui accélérera l'assèchement. L'assèchement est approximativement 30 % plus rapide à un taux d'humidité relative de 50 % qu'à un taux de 70 %. Dans un cas bien précis comportant une cavité de ventilation de 19 mm et des orifices de ventilation supérieurs et inférieurs de 12 mm (S19-12), le taux d'assèchement relatif à un taux d'humidité relative de 80, 70, 60 et 50 % (moyennant un taux de référence de 80 %) se traduit par des ratios de 1,0, 1,20, 1,39 et 1,57 respectivement.

Tableau 5 - Effet des paramètres de ventilation et de l'humidité relative dans le caisson sur le taux d'assèchement hebdomadaire (g/m²/semaine) - pression neutre, stucco découplé, caisson à une température de 5 °C

Hauteur du jeu de ventilation (mm)	Profondeur de la cavité de ventilation (mm)						Profondeur de la cavité de ventilation (mm)				
	38	19	12	5	2,5	1	38	19	12	5	2,5
	H.R. dans le caisson = 50 %						H.R. dans le caisson = 60 %				
1	78	70	67	25	10	10	70	61	59	22	10
2,5	80	74	69	23	9	s.o.	72	66	60	20	10
5	84	76	72	25	s.o.	s.o.	75	67	64	22	s.o.
12	84	77	73	s.o.	s.o.	s.o.	74	68	64	s.o.	s.o.
19	82	77	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	73	68	s.o.	s.o.	s.o.
38	80	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	71	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
	H.R. dans le caisson = 70 %						H.R. dans le caisson = 80 %				
1	61	53	51	19	10	10	53	44	43	16	10
2,5	63	57	52	17	10	s.o.	54	48	43	15	10
5	66	58	55	19	s.o.	s.o.	57	49	46	16	s.o.
12	65	59	55	s.o.	s.o.	s.o.	55	49	46	s.o.	s.o.
19	64	59	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	55	49	s.o.	s.o.	s.o.
38	61	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	52	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.

Figure 3. Effet des conditions d'humidité relative dans le caisson sur les taux d'assèchement hebdomadaires en fonction de la profondeur de la cavité de ventilation, pour un jeu de ventilation de 2,5 mm - stucco découplé, temp. = 5 C



En ce qui concerne les cavités de ventilation de 5 mm de profondeur et moins, le taux d'assèchement est relativement plus faible que celui des cavités de ventilation de 12 mm ou plus. Cette démonstration est faite dans la figure 3 où, pour un jeu de ventilation de 2,5 mm, l'effet de la cavité de ventilation est évident en tant que fonction de l'espace entre le mur et l'arrière du stucco.

Questions 1 et 3 : Quelle est l'influence de la profondeur de la cavité de ventilation et des dimensions du jeu de ventilation sur les taux d'assèchement par rapport à la température du caisson d'essais?

Les résultats des 84 simulations visant à répondre à cette question sont fournis au tableau 6. On y a résumé les taux d'assèchement hebdomadaires pour toutes les combinaisons d'espace et de jeux de ventilation, et pour quatre différentes températures à l'intérieur du caisson d'essais, c'est-à-dire de 5 °C à 20 °C, par accroissement de 5 °C. Pour cette comparaison, l'humidité relative a été maintenue à 50 % dans le caisson.

Au tableau 6, on voit encore que la profondeur de la cavité de ventilation était plus importante que la taille du jeu de ventilation. L'augmentation de la température du caisson d'essais, tout en maintenant une faible humidité relative, a accru les taux d'assèchement hebdomadaires. La solution pour le cas ne prévoyant aucun différentiel de température d'une face à l'autre du mur était instable, sauf pour les cavités les plus profondes combinées aux jeux de ventilation des plus petites dimensions. Dans le tableau, l'absence d'information dénote une solution instable. L'instabilité est fonction du schéma computationnel itératif employé, et non d'un mouvement nécessairement instable. Ce qui ne signifie pas que le mouvement d'air sera nécessairement stable. En fait, il ne le sera probablement pas dans certaines conditions.

Encore une fois, pour un cas bien précis comportant une cavité de ventilation de 19 mm et des orifices de ventilation supérieurs et inférieurs de 12 mm (S19-12), le taux d'assèchement relatif à une température de 5, 10, 15 et 20 °C (moyennant une température de référence de 5 °C) se traduit par des ratios de 1,0, 1,19 et 1,38 respectivement (le dernier ratio n'est pas fourni en raison de l'instabilité de la solution de ventilation du cas à 20 °C).

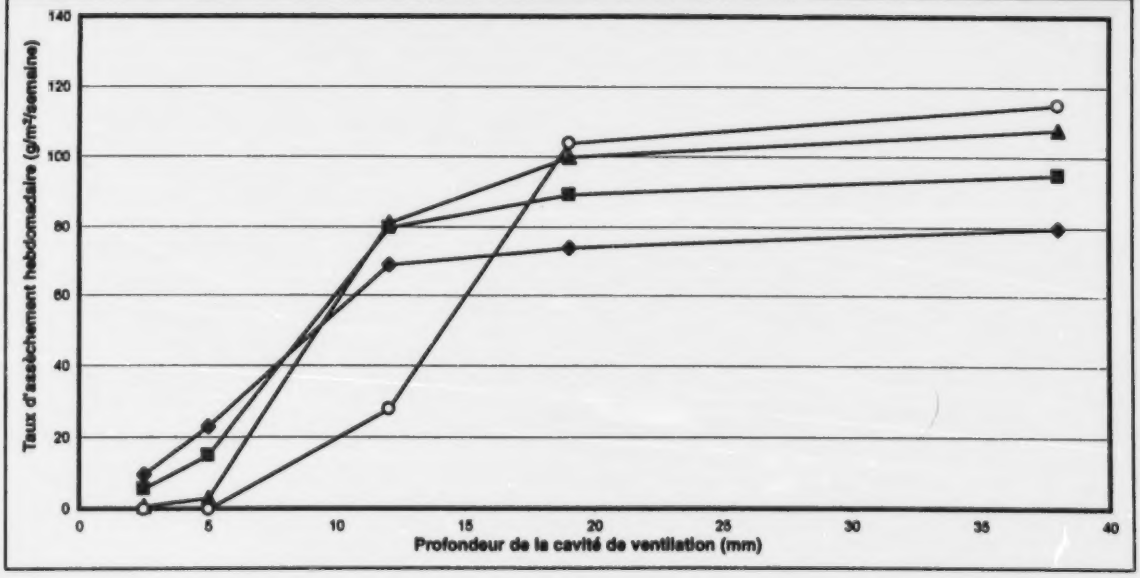
L'assèchement du mur lorsque les températures intérieures et extérieures sont identiques représente le pire des scénarios en raison de l'absence de poussée thermique. La diffusion est toujours possible, sauf que la durée de séjour de l'air dans la cavité de ventilation est longue.

À la figure 4, on a illustré l'effet de la variation des différentiels de température à travers le mur pour un jeu de ventilation de 2,5 mm de hauteur. Encore une fois, les espaces de ventilation de 12 mm et plus permettaient un assèchement efficace. Quant aux espaces de ventilation de 5 mm et moins, les taux d'assèchement étaient beaucoup plus bas.

Tableau 6. Effet des paramètres de ventilation et de la température dans le caisson sur le taux d'assèchement hebdomadaire (g/m²/semaine) - pression neutre, stucco découplé, H.R. dans le caisson = 50 %

Hauteur du jeu de ventilation (mm)	Largeur de la cavité de ventilation (mm)						Largeur de la cavité de ventilation (mm)				
	38	19	12	5	2,5	1	38	19	12	5	2,5
	Température du caisson = 5 °C						Température du caisson = 10 °C				
1	78	70	67	25	10	10	89	82	76	17	7
2,5	80	74	69	23	9	s.o.	95	89	80	15	6
5	84	78	72	25	s.o.	s.o.	99	91	83	17	s.o.
12	84	77	73	s.o.	s.o.	s.o.	99	92	84	s.o.	s.o.
19	82	77	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	99	93	s.o.	s.o.	s.o.
38	80	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	97	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
	Température du caisson = 15 °C						Température du caisson = 20 °C				
1	97	88	76	4	2	2	94	81	27	-	-
2,5	108	100	81	3	1	.s.o.	115	104	28	-	-
5	113	104	85	4	s.o.	s.o.	126	108	36	-	s.o.
12	115	106	86	s.o.	s.o.	s.o.	134	-	-	s.o.	s.o.
19	116	106	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	-	-	s.o.	s.o.	s.o.
38	115	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	-	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.

Figure 4. Effet de la température du caisson sur les taux d'assèchement hebdomadaires en fonction de la profondeur de la cavité de ventilation, pour un jeu de ventilation de 2,5 mm, stucco découplé, H.R. = 50 %



Le tableau 6 et la figure 4 montrent que les températures de caisson supérieures au point de contrôle sont susceptibles de faire augmenter le taux d'assèchement.

Murs de stucco couplé

Lorsque le stucco est posé sur le mur de manière à permettre l'absorption et la désorption d'humidité provenant du mur arrière ou de l'air à l'intérieur du caisson, la redistribution d'humidité et l'assèchement deviennent plus complexes. Des mécanismes se concurrencent pour permettre à l'humidité du mur de s'échapper par ventilation (comme avant) et par diffusion dans le stucco. Bien entendu, il existe des mécanismes additionnels d'élimination de l'humidité communs aux cas de stucco couplé et découplé. Il est possible que l'eau s'échappe par drainage lorsque les conditions permettent la condensation sur des surfaces incapables d'absorber davantage d'humidité, et que les pellicules d'eau ne puissent plus résister à la force exercée par la gravité. On n'a pas tenu compte de ces mécanismes dans le cadre des simulations de la présente étude.

On a déterminé que le taux d'humidité initial du stucco était important pour l'évaluation de la quantité d'humidité éliminée du mur par ventilation ou par transfert par diffusion dans le stucco. Lorsqu'un mur d'essai revêtu de stucco est exposé pour la première fois à un milieu particulier, il existe une période au cours de laquelle l'humidité qu'il contient augmentera ou diminuera, selon son équilibre hygroscopique, avant d'être exposé. Cet effet sera illustré plus en détail dans la présente section. Pour éviter cet effet expérimental, la teneur en humidité initiale du stucco a été enregistrée dans le programme WALLDRY afin qu'elle soit équilibrée par rapport aux conditions dans le caisson d'essais. Pour chacun des cas où l'humidité relative dans le caisson d'essais est soumise à un régime permanent différent, une teneur en humidité différente est établie afin que les variations ultérieures des niveaux d'humidité dans le cadre des conditions expérimentales prévues ne soient pas diminuées par les gains ou les pertes enregistrés par le stucco.

Question 4 : Quelle est l'influence du taux d'humidité relative à l'intérieur du caisson d'essais sur les taux d'assèchement des murs revêtus de stucco couplé? Quelle quantité d'humidité s'échappe par diffusion comparativement à la ventilation?

Une seule série de conditions en caisson d'essais a été examinée pour le revêtement couplé. Elle est axée sur une variation de l'humidité relative dans le caisson d'essais. Encore une fois, les conditions d'humidité relative ont fluctué entre 50 et 80 %, par accroissement de 10 degrés pour chaque série de 21 combinaisons de paramètres. Dans chaque cas, la teneur en humidité initiale du stucco était ajustée en fonction de ces conditions afin d'éviter de grands changements au niveau du conditionnement initial. D'une durée de huit jours (les données de la première journée étaient ignorées), les simulations étaient suffisamment linéaires et représentatives des semaines suivantes pour que les taux d'assèchement initiaux soient jugés représentatifs.

Les résultats sont présentés aux tableaux 7 et 8. Le tableau 7 correspond au tableau 5 sauf que les données qu'il contient représentent le taux d'assèchement net des éléments en bois des murs à l'étude. Il en a découlé une augmentation de l'humidité accumulée dans le panneau de bois qui sert de revêtement intermédiaire. Même si nous l'avions prévu, nous avons été saisis par l'augmentation de l'assèchement des murs attribuable à la diffusion de l'humidité par le mur de stucco, provoquant ainsi un changement total plus important. Le tableau 8 reflète le changement de teneur en humidité du stucco pour une même période d'assèchement d'une semaine. Une valeur positive représente une baisse de la teneur en humidité par rapport aux conditions qui prévalaient sept jours plus tôt. Une valeur massique négative représente la quantité d'humidité retenue par le stucco comparativement à la quantité retenue sept jours plus tôt. Ces valeurs indiquent comment une partie de l'humidité a pu s'échapper du mur, surtout dans le cas des systèmes de revêtement en stucco relativement fermés. Bien que les quantités soient faibles, elles représentent une amélioration importante de la capacité d'assèchement.

Tableau 7. Effet des paramètres de ventilation et de l'humidité relative dans le caisson sur le taux d'assèchement hebdomadaire du bois d'ossature (g/m²/semaine) - pression neutre, stucco couplé, température dans le caisson de 5 °C

Hauteur du jeu de ventilation (mm)	Profondeur de la cavité de ventilation (mm)						Profondeur de la cavité de ventilation (mm)					
	38	19	12	5	2,5	1	38	19	12	5	2,5	1
	H.R. dans le caisson = 50 %						H.R. dans le caisson = 60 %					
1	99	83	82	61	59	58	91	75	74	56	54	53
2,5	98	87	79	56	54	s.o.	90	79	71	50	49	s.o.
5	101	88	86	61	s.o.	s.o.	93	80	78	56	s.o.	s.o.
12	98	89	86	s.o.	s.o.	s.o.	90	80	78	s.o.	s.o.	s.o.
19	97	89	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	88	80	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
38	92	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	84	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
	H.R. dans le caisson = 70 %						H.R. dans le caisson = 80 %					
1	82	66	66	50	48	47	74	57	56	43	41	40
2,5	82	70	65	44	42	s.o.	73	61	53	37	35	s.o.
5	84	71	69	50	s.o.	s.o.	75	62	60	43	s.o.	s.o.
12	81	71	69	s.o.	s.o.	s.o.	72	62	60	s.o.	s.o.	s.o.
19	79	71	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	70	62	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
38	75	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	65	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.

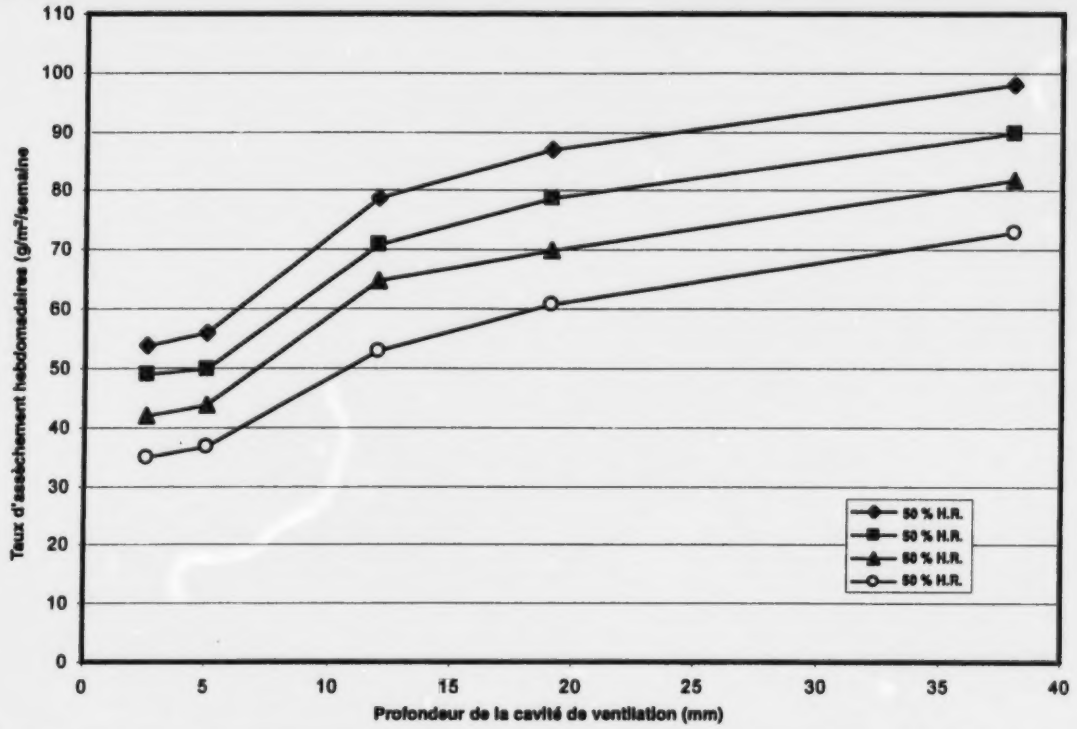
Tableau 8. Assèchement net du stucco en tant que fonction des caractéristiques des orifices de ventilation et de l'humidité relative dans le caisson (g/m²/semaine) - pression neutre, stucco couplé, température dans le caisson de 5 °C

Hauteur du jeu de ventilation (mm)	Profondeur de la cavité de ventilation (mm)						Profondeur de la cavité de ventilation (mm)					
	38	19	12	5	2,5	1	38	19	12	5	2,5	1
	H.R. dans le caisson = 50 %						H.R. dans le caisson = 60 %					
1	0	2	0	-25	-42	-43	3	6	4	-21	-35	-36
2,5	4	5	4	-24	-38	s.o.	6	8	7	-18	-29	s.o.
5	3	5	4	-28	s.o.	s.o.	5	8	7	-21	s.o.	s.o.
12	3	5	4	s.o.	s.o.	s.o.	4	8	7	s.o.	s.o.	s.o.
19	2	5	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	4	8	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
38	2	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	4	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
	H.R. dans le caisson = 70 %						H.R. dans le caisson = 80 %					
1	6	10	8	-15	-26	-27	12	17	15	-6	-16	-16
2,5	9	12	12	-11	-20	s.o.	15	19	20	-2	-8	s.o.
5	8	12	12	-15	s.o.	s.o.	12	19	18	-6	s.o.	s.o.
12	6	12	12	s.o.	s.o.	s.o.	9	18	19	s.o.	s.o.	s.o.
19	5	12	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	8	18	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
38	5	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	8	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.

L'exemple du mur de stucco de référence utilisé précédemment (S19-12) donne des ratios d'assèchement relatif pour la gamme de 80, 70, 60 et 50 % (moyennant un taux de référence de 80 %) de 1,00, 1,15, 1,29 et 1,44 respectivement (comparativement à 1,0, 1,20, 1,39 et 1,57 pour le cas du stucco découplé). Le taux d'assèchement relatif des systèmes de stucco fermés (avec le moins de ventilation possible) est amélioré radicalement.

La figure 5 a été préparée afin de montrer les taux d'assèchement d'un jeu de ventilation de 2,5 mm. Ces données correspondent à l'information montrée dans la figure 3 pour les murs de stucco découplé. On y montre l'amélioration générale de l'assèchement des murs, en particulier pour les cavités de ventilation de profondeur inférieure à 12 mm.

Figure 5. Effet des conditions d'humidité relative dans le caisson — effet de la profondeur de la cavité de ventilation sur les taux d'assèchement hebdomadaires lorsque le stucco est couplé, jeu de ventilation de 2,5 mm, temp. = 5 °C



Question 5 : Quelles difficultés rencontrera-t-on pour ce qui est de relier la perte d'humidité et sa redistribution dans les murs comparativement à la masse totale gagnée ou perdue pendant une expérience sur l'assèchement?

Pour répondre à cette question, deux murs de stucco couplé ont fait l'objet de simulations d'une durée de cinq mois (espace de 19 mm et de 38 mm — même hauteur de jeu de ventilation de 12 mm). Deux conditions en caisson d'essais ont été choisies (humidité relative de 50 et de 70 %) pour une même température de 5 °C. Dans chaque cas, la teneur en humidité d'équilibre du stucco a été fixée au même niveau que l'humidité relative dans le caisson d'essais, ainsi qu'à un niveau supérieur et inférieur, dans des simulations distinctes. Lorsqu'un décalage des conditions se produisait, par exemple si l'humidité relative dans le caisson était fixée à 50 %, on supposait que le stucco avait atteint des conditions d'équilibre à 70 % d'humidité relative et vice versa. Cette mesure permettait un essai pratique. Il est peu probable que le stucco présente les conditions initiales du caisson d'essais, à moins que ce dernier ne possède au départ les mêmes conditions que le cas « intérieur » avant la mise en position d'essai du mur.

Le changement de masse total pour les deux murs est montré aux figures 6 et 7 respectivement. L'assèchement des deux murs est semblable, sauf que celui qui est doté d'une cavité de ventilation de 38 mm s'assèche plus rapidement, permettant à environ 7 % de plus d'humidité de s'échapper. Si l'on se reporte à la figure 6, il apparaît évident qu'il faudrait probablement de 15 à 30 jours avant que le taux d'assèchement ne reflète la perte d'humidité nette des éléments de bois du mur si le stucco était préconditionné à une teneur en humidité différente. Par conséquent, pour suivre les gains et les pertes d'humidité dans des couches précises, il faut

Figure 6. Variation de poids totale prévue pour le mur S19-12 sous différentes conditions

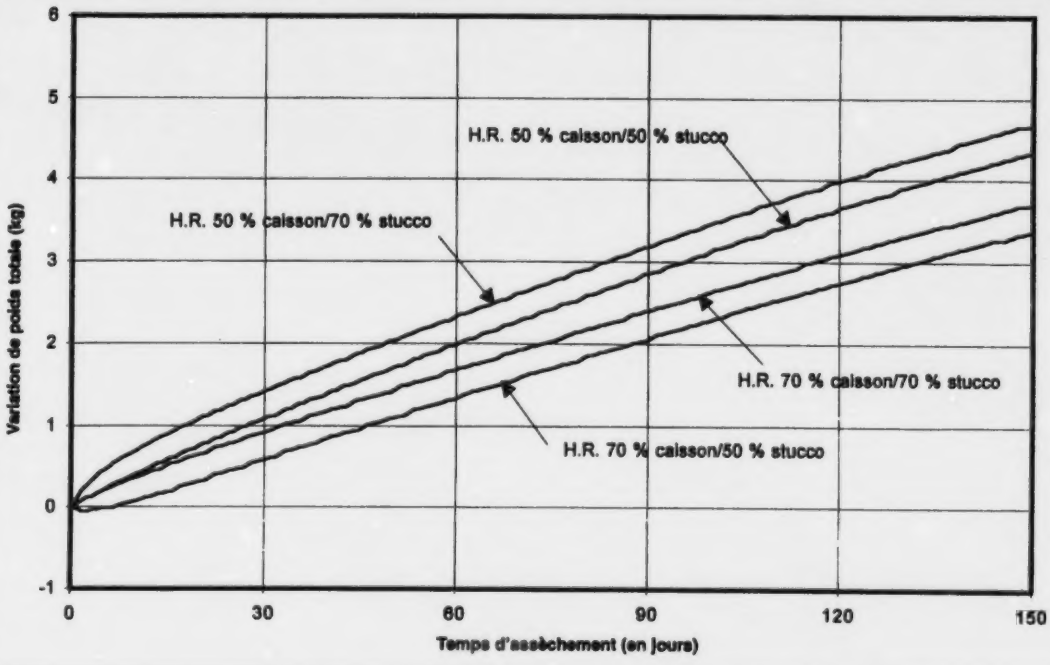
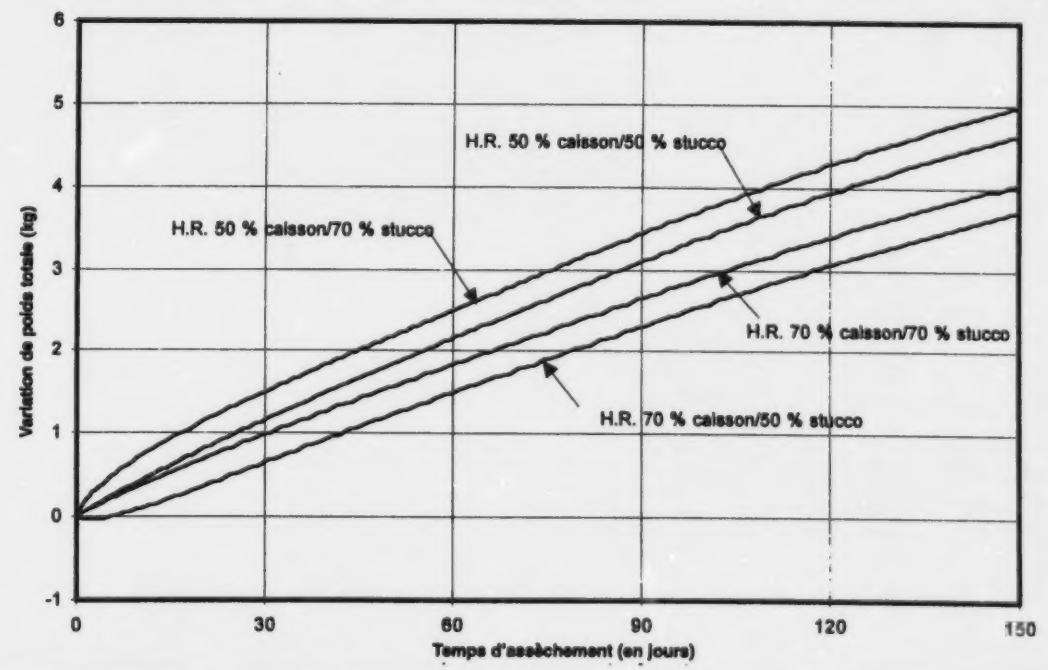


Figure 7. Variation de poids totale prévue pour le mur S38-12 sous différentes conditions



disposer de suffisamment d'instruments pour mesurer les conditions réelles initiales du bois et du stucco, ainsi que les changements ultérieurs qui se produisent pendant l'expérience.

Le caisson d'essais présentant un taux d'humidité relative de 70 % et un revêtement de stucco dont l'humidité relative est équilibrée à 50 % constitue un cas particulièrement intéressant. On prévoit que le mur ne semblera pas perdre de poids pendant un certain temps. En même temps que le stucco accumulera de l'humidité, il en perdra par l'entremise de la ventilation de la cavité située derrière lui. Chaque mur aura un comportement quelque peu différent, selon l'équilibre entre l'humidité perdue par le mur par l'entremise de la ventilation, de la diffusion ou des deux mécanismes, et l'humidité gagnée ou perdue directement par le stucco.

Question 6 : Quelle est la distribution de la perte d'humidité dans les murs, et quels sont les gradients d'humidité des différents éléments des murs?

Tel que relevé précédemment, une grande quantité d'information peut être générée pour chaque mur, même s'il est de construction simple. Le module d'extraction du programme WALLDRY a été conçu de manière à ne fournir que des informations utiles. Ces informations peuvent être importées dans un tableur qui fournit des tableaux préformatés prêts à examiner. Le mur type choisi pour illustrer les changements qui se produisent est le S19-12, soit un des murs d'essai mentionnés à la question 6.

Dans le cas choisi à titre d'exemple, le taux d'humidité relative est de 70 %, et le stucco a atteint un taux d'humidité relative plus bas qui atteint environ 50 %. L'humidité relative intérieure du projet de l'EDRA devrait être encore plus basse, disons de 40 %, mais cet exemple illustre l'ordre de grandeur des changements auxquels on peut s'attendre.

Les résultats sommaires sont présentés aux figures 8, 9, 10 et 11. La figure 8 montre l'humidité totale perdue ou gagnée par les poteaux, le revêtement intermédiaire en panneaux de copeaux orientés, le revêtement de stucco et l'ensemble du mur. Toutes les valeurs positives représentent l'humidité perdue par un élément ou par le mur; une valeur négative représente l'humidité gagnée par cet élément.

La figure 9 montre la perte d'humidité rapide subie normalement par les faces des poteaux mouillés, et la redistribution de cette humidité aux autres éléments du mur. On a supposé que la teneur en humidité de l'âme du matériau était de 25 % à l'origine. L'âme du bois d'ossature continue d'accumuler de l'humidité pendant un certain temps jusqu'à ce que les parois du bois soient suffisamment sèches pour que l'âme commence aussi à s'assécher. Le programme WALLDRY traite les éléments du poteau comme des couches individuelles et uniformes sans tenir compte du gradient thermique ou du gradient d'humidité entre les faces intérieures et extérieures de la cavité murale. Il est vraisemblable que la profondeur des cavités entre les poteaux des murs variera. Toutefois, la formulation initiale du code effectuée dans les années 80 a empêché la sélection d'une grille plus précise, étant donné les limites imposées à la taille du programme en DOS.

La figure 10 montre la distribution de l'humidité sur la face intérieure du revêtement intermédiaire en panneaux de copeaux orientés, du bas vers le haut (éléments 1, 5 et 9). Les éléments inférieurs mettent plus de temps à absorber l'humidité et à sécher parce que la température plus faible du mouvement d'air à la base du mur et à l'intérieur de l'espace de ventilation réduit la capacité d'assèchement du mur. Au fur et à mesure que l'air se réchauffe et qu'il monte dans l'espace de ventilation, sa capacité d'accumuler de l'humidité s'accroît, ce qui permet un assèchement plus élevé au haut du mur qu'à sa base. La face intérieure du revêtement intermédiaire en panneaux de copeaux orientés est aussi la couche sur laquelle la condensation de la vapeur d'eau provenant des poteaux se dépose. Dans ce cas-ci, l'assèchement est insuffisant en cinq mois pour ramener le niveau d'humidité à 15 % (teneur en humidité globale), soit la teneur nécessaire pour empêcher la croissance de moisissures.

Figure 8. Assechement de chacun des principaux elements du mur S19-12, orifices de ventilation inferieur et superieur ouverts de 12 mm, 70 °₀ d'humidite relative et temperature de 5 C dans le caisson, stucco conditionne a 50 °₀ d'humidite relative

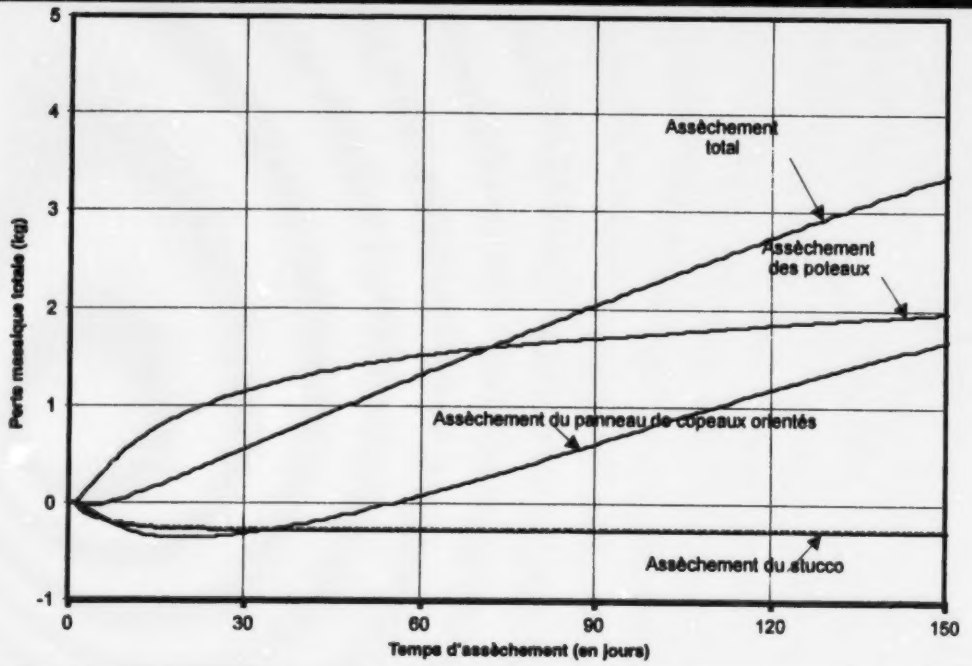


Figure 9. Assechement de l'âme et de la paroi du bois d'ossature, orifices de ventilation inferieur et superieur ouverts, mur S19-12, 70 °₀ d'humidite relative et temperature de 5 C dans le caisson, stucco conditionne a 50 °₀ d'humidite relative

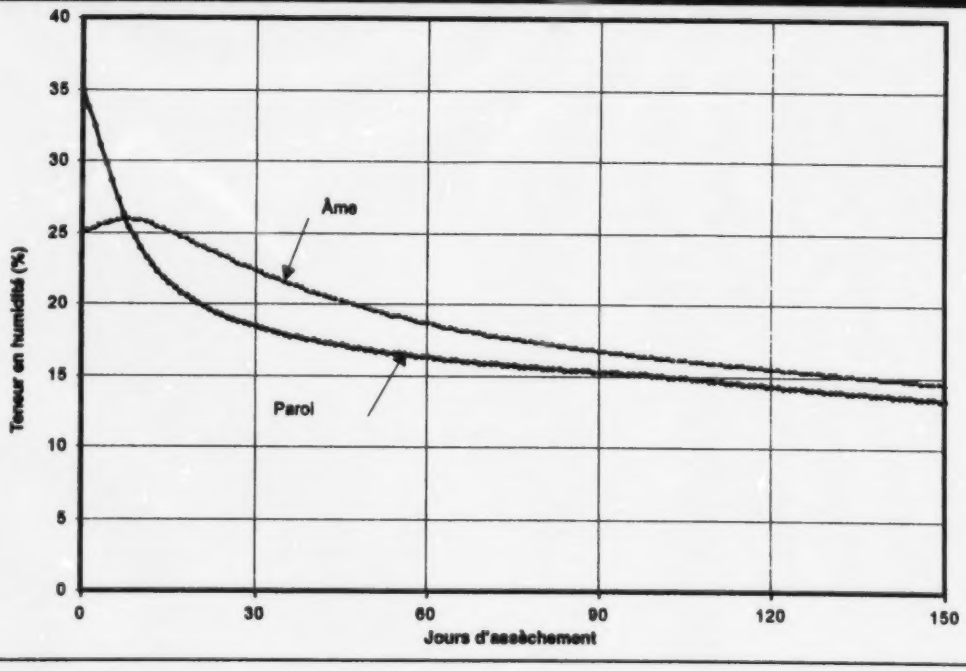


Figure 10. Assèchement de la couche intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifices de ventilation inférieur et supérieur ouverts de 12 mm, 70 % d'humidité relative et température de 5 C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

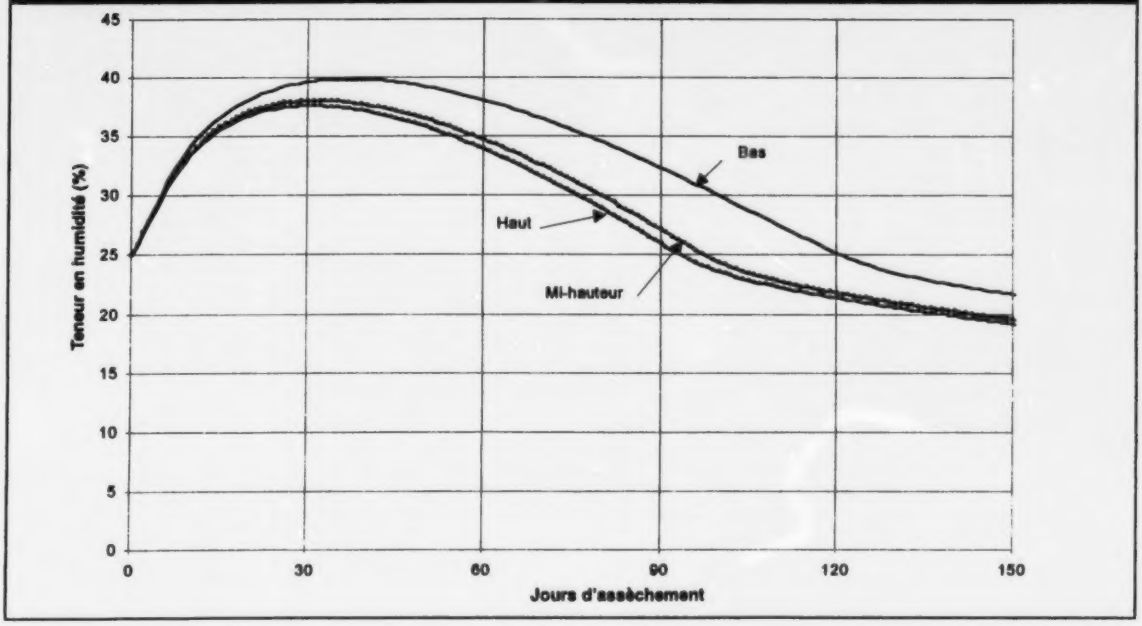
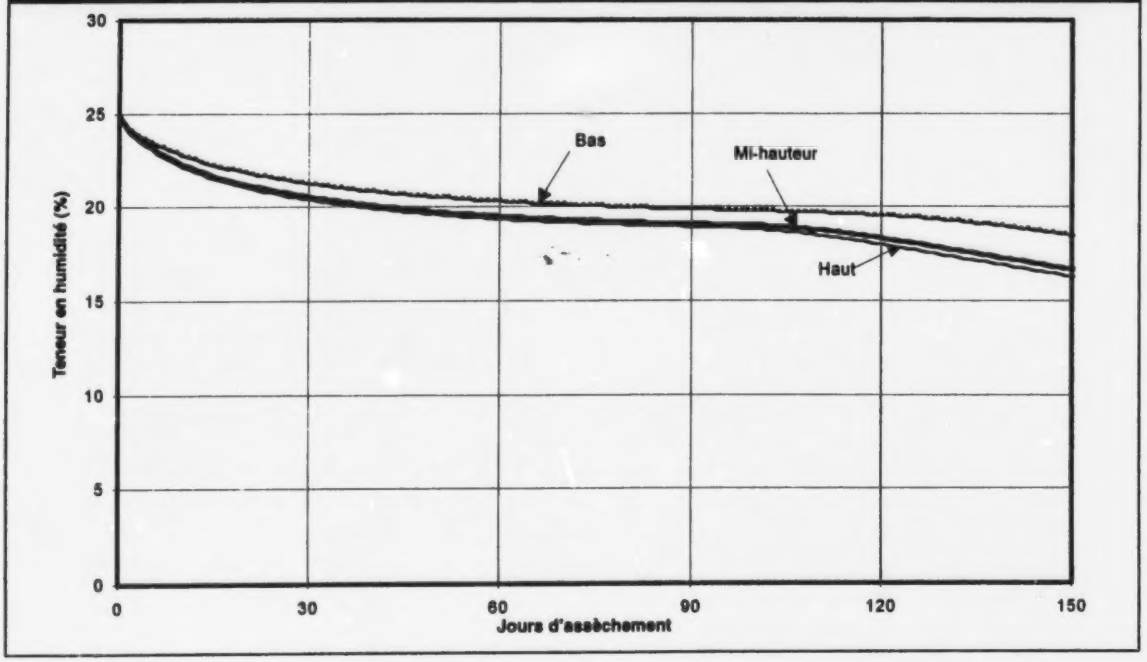


Figure 11. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifices de ventilation inférieur et supérieur ouverts de 12 mm, 70 % d'humidité relative et température de 5 C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative



La figure 11 montre que la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés n'accumule pas l'humidité dans une même proportion, car celle-ci s'échappe par l'espace de ventilation et au travers de deux épaisseurs de papier de construction 30 minutes. Ces conditions ont fait en sorte que la teneur en humidité n'est jamais descendue en bas de 15 % pendant la simulation d'une durée de cinq mois. Il est peu probable que les conditions en régime permanent se produisent en réalité, ce qui rend non pertinente la durée de séchage déterminée dans cet essai, sauf en termes relatifs.

Question 7 : Quelle est la distribution de la perte d'humidité à l'intérieur des murs lorsque le jeu de ventilation supérieur est fermé?

Pour illustrer ce cas, on a utilisé le même exemple de mur que pour la question précédente. On a donné aux coefficients de l'orifice de ventilation supérieur la même résistivité que les jeux de ventilation virtuels du mur de stucco.

Les figures 12, 13, 14 et 15 correspondent aux figures 8, 9, 10 et 11 pour la cavité de ventilation entièrement ouverte. Les taux d'assèchement total montrés à la figure 12 sont quelque peu altérés. Les poteaux sèchent à l'intérieur de la cavité comme avant. Mais le changement d'humidité total est beaucoup moins élevé, une situation surtout attribuable à l'absence de mouvement d'air dans la cavité de ventilation. Toutefois, la température de l'air et son humidité relative sont plus élevées qu'avant, et une quantité accrue d'humidité est capable de s'échapper par diffusion par le stucco. En outre, une plus grande quantité d'humidité est retenue dans le stucco. Par exemple, les teneurs en humidité intérieures et extérieures des faces du stucco étaient toutes deux de 0,89 % dans le cas de l'orifice de ventilation ouvert. Dans le cas de l'orifice de ventilation supérieur fermé, les teneurs en humidité intérieures et extérieures étaient de 0,93 % et de 1,31 % respectivement. La perte de poids totale était 39 % moins élevée avec l'orifice de ventilation supérieur fermé.

La figure 13 montre que la teneur en humidité du poteau a varié beaucoup, comme dans le cas où l'orifice de ventilation supérieur est fermé.

La figure 14 montre, qu'à tous les niveaux du mur, la teneur en humidité de la couche intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés était la même, une situation surtout attribuable à l'absence de mouvement d'air pour enlever l'humidité de manière différentielle. Il a fallu la presque totalité de la période d'assèchement de cinq mois pour que le panneau de copeaux orientés contenu dans le mur revienne à un niveau d'humidité aussi élevé qu'à l'origine.

La figure 15 montre que la teneur en humidité de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés est restée relativement élevée tout au long de la période à cause du faible taux d'assèchement.

Comme il n'y aura pas d'essai sur les effets d'un orifice de ventilation supérieur entièrement fermé, et que certaines fuites se produiront inévitablement, nous supposons la présence d'un jeu de 1 mm qui permettra une certaine ventilation. Les résultats de ce cas qui a été soumis à un essai sont présentés aux figures 16, 17 et 18.

À la figure 18, laquelle correspond à la figure 8 (où l'air n'est soumis à aucune restriction étant donné la présence d'un orifice de ventilation de 12 mm) ainsi qu'à la figure 12 (dont l'orifice de ventilation est entièrement fermé), nous constatons que les résultats sont pratiquement identiques à ceux de la figure 8. La perte de poids totale d'un mur doté d'un orifice de ventilation supérieur partiellement ouvert n'était inférieure que de 3 % par rapport à un mur doté d'un orifice de ventilation supérieur entièrement ouvert (de 12 mm, dans cet exemple). La perte de poids totale dans le cas d'un orifice de ventilation supérieur entièrement fermé était inférieure de 39 % par rapport à un orifice de ventilation supérieur entièrement ouvert. Autrement dit, un léger mouvement par le haut de la cavité de ventilation aide énormément à réduire l'humidité dans le mur. Vu l'importance de cette caractéristique, elle ne devrait pas être laissée au hasard. Des moyens fiables devraient être pris afin de permettre qu'un certain mouvement d'air puisse ventiler l'arrière des murs de stucco et en réduire l'humidité. L'aménagement d'une petite ouverture ne devrait pas permettre l'infiltration, dans cet espace, de la pluie poussée par le vent.

Figure 12. Assèchement de chacun des principaux éléments du mur S19-12, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 %

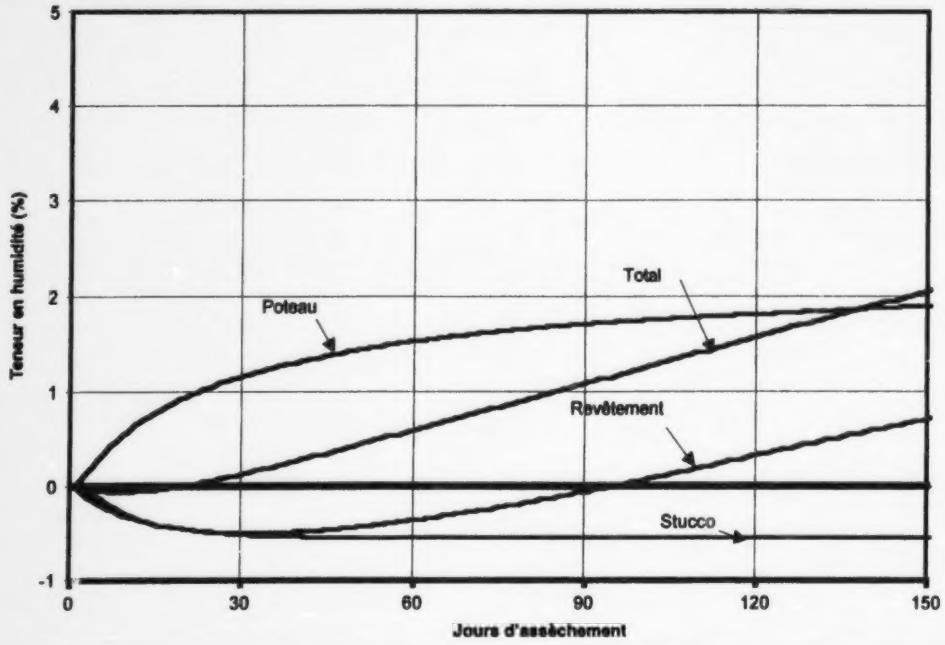


Figure 13. Assèchement de la paroi et de l'âme du bois d'ossature, mur S19-12, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

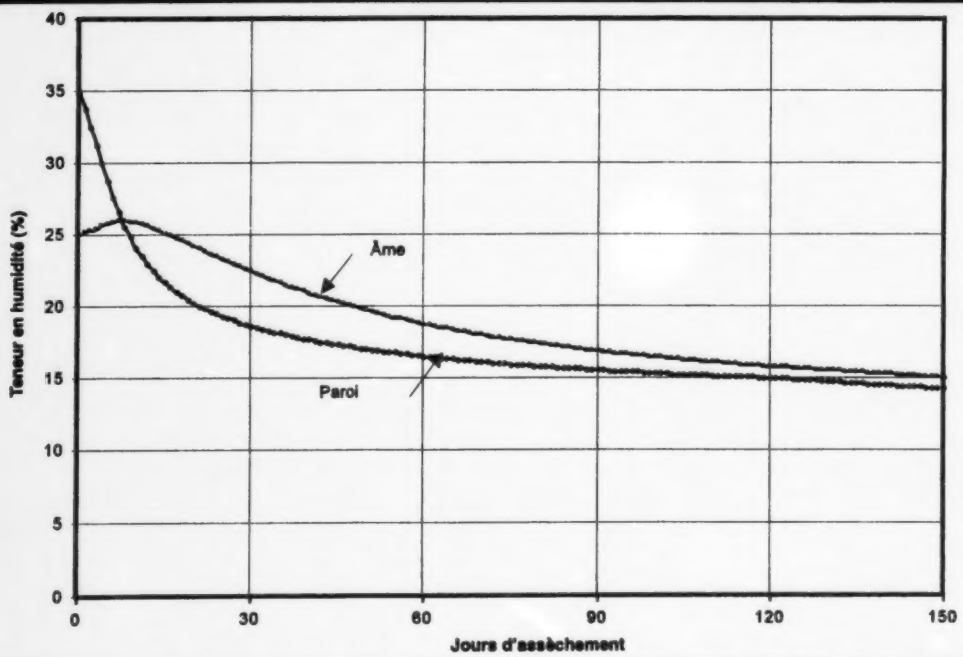


Figure 14. Courbe d'assèchement de la paroi intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

Figure 15. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

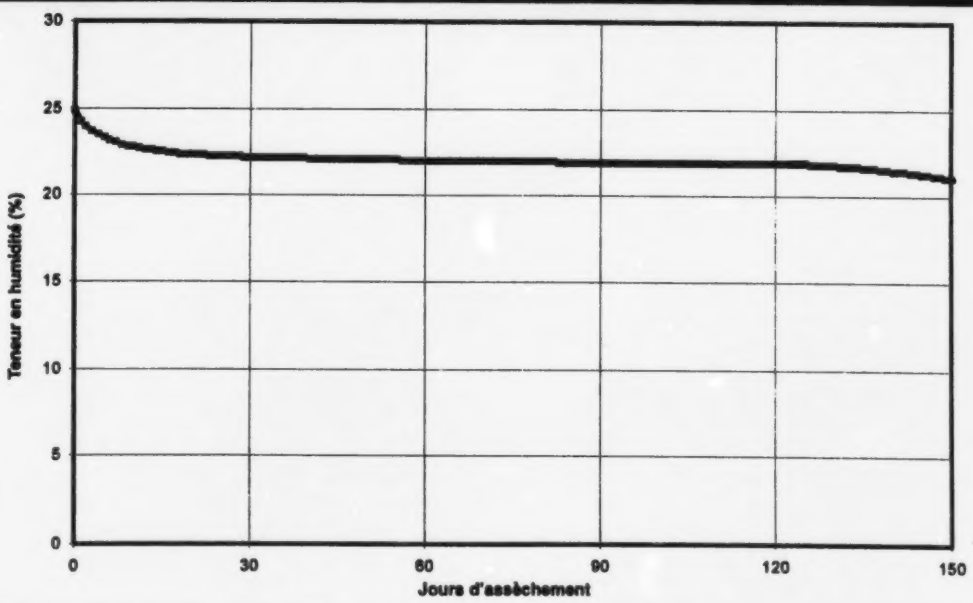


Figure 16. Assèchement de chacun des principaux éléments du mur S19-12, orifice de ventilation supérieur partiellement fermé (1 mm), 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

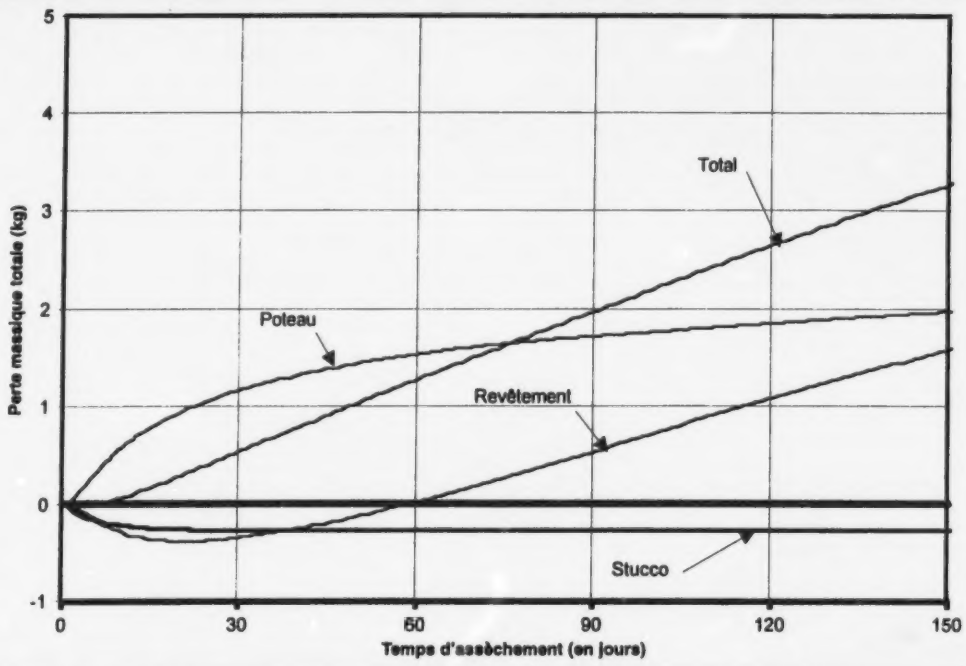


Figure 17. Courbe d'assèchement de la paroi intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, orifice de ventilation supérieur partiellement ouvert (1 mm), 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

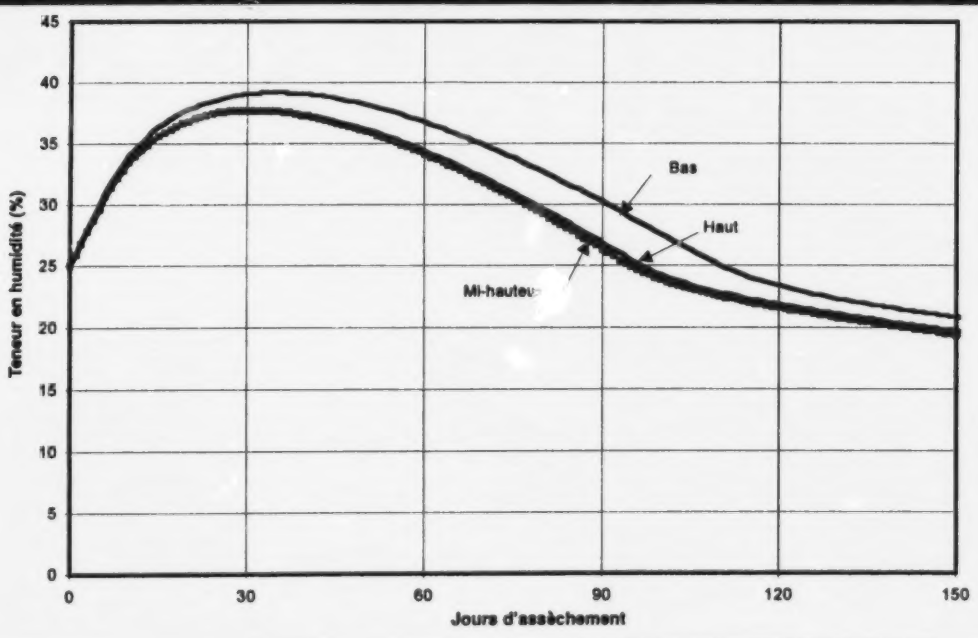
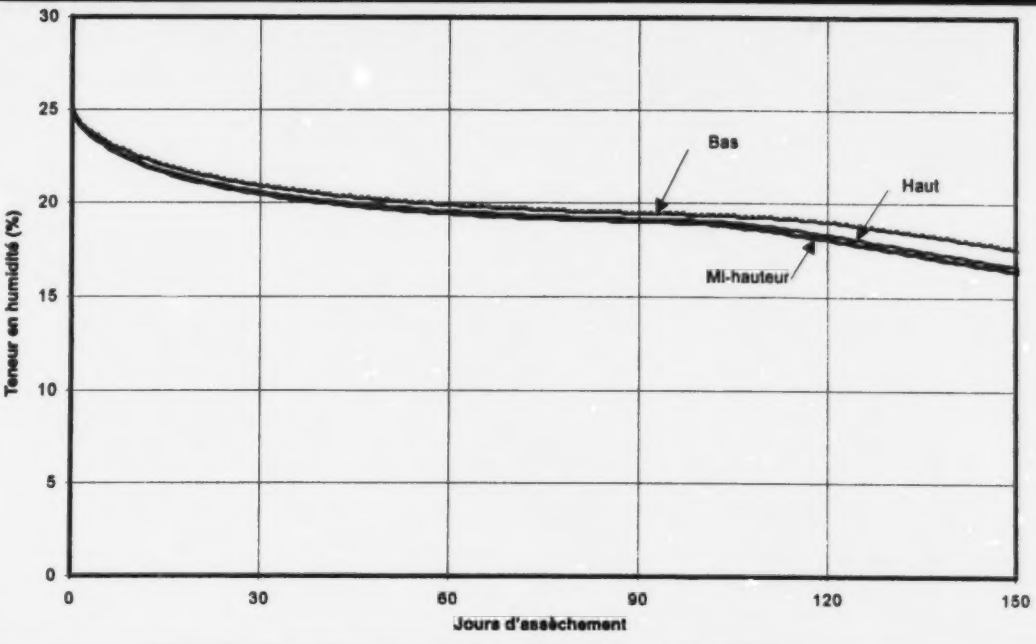


Figure 18. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, mouvement d'air partiel par l'orifice de ventilation supérieur (1 mm), 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative



Question 8 : Quel effet a un vent simulé sur les taux d'assèchement d'un mur type [S19-05]?

Les résultats de ce cas sont montrés au tableau 9. Contrairement aux attentes, le taux d'assèchement total du mur a été diminué. On a supposé que le mur de stucco couplé avait atteint les mêmes conditions d'équilibre pour l'humidité relative que le caisson climatique. Au cours de la période de cinq mois, l'assèchement a été de 4,268 kg, sans vent, et de 4,181 kg, avec vent. Cette situation s'explique surtout par le fait que le vent a pratiquement doublé la vélocité à l'intérieur de la cavité de ventilation. La présence de vent entraînait une baisse de température et une légère hausse de l'humidité relative. À la fin, la quantité d'humidité éliminée par la ventilation était légèrement inférieure. En outre, le stucco extrayait un peu plus d'humidité de la cavité de ventilation parce qu'il était plus chaud en l'absence de vent. Au cours de la période, la perte d'humidité totale était 2 % plus basse en présence de vent. Un niveau d'humidité relative plus élevé dans le caisson aurait diminué l'assèchement davantage. Une cavité de ventilation dotée d'ouvertures plus grandes aurait eu les mêmes effets en facilitant encore davantage le mouvement d'air.

Cet examen ne tient pas compte d'une caractéristique des cavités de ventilation pour laquelle il n'existe aucune documentation et qui est susceptible de renverser les conclusions tirées précédemment. On a supposé que les propriétés du mouvement d'air à l'intérieur du système de la cavité de ventilation étaient laminaires, ce que reflètent les coefficients de débit. À très basses vélocités, il pourrait en découler une résistance considérable au mouvement d'air. Cependant, l'augmentation de la vélocité de l'air peut créer une turbulence, si les caractéristiques des surfaces s'y prêtent, une diminution de la résistance au mouvement d'air, ainsi qu'une amélioration considérable au niveau du mélange d'air et de l'élimination de l'humidité. Afin de mieux comprendre l'effet du vent sur l'élimination de l'humidité, même en conditions marginales, il

faudrait déterminer les coefficients de débit d'air dans les cavités de ventilation soumises à des différentiels de pression faibles.

Les murs de stucco existants pourraient aussi permettre d'autres formes d'infiltration d'air. De petites fissures peuvent se former sur le mur et permettre à l'air d'entrer ou de sortir, en plus des passages déjà prévus à cet effet, comme c'est le cas des bardages en vinyle ou en bois. Dans le cas où cette situation serait fréquente, ces effets pourraient être modélisés en supposant un certain mouvement d'air par les joints virtuels du stucco.

Question 9 : Compte tenu des propriétés entrées dans WALLDRY, quelle est la différence de taux d'assèchement lorsqu'on utilise du contreplaqué au lieu d'un panneau de copeaux orientés?

Seul le mur d'essai S19-12PL a fait l'objet d'un passage machine, c'est-à-dire le même mur fondamental qu'avant, sauf qu'il a été construit avec du contreplaqué de 12,5 mm plutôt que des panneaux de copeaux orientés, et qu'on l'a soumis aux conditions courantes proposées pour le caisson d'essais (5 °C et 70 % d'humidité relative). On considère que le stucco est couplé au mur et l'on suppose qu'il possède une condition d'équilibre initiale compatible à l'intérieur du caisson.

Malgré la simplicité apparente de la comparaison, il existe une complication qui touche les résultats et l'interprétation. Compte tenu des données d'entrées présumées, on suppose que la teneur en humidité initiale du revêtement intermédiaire est de 25 %. Il s'agit de la teneur en humidité à sec. Actuellement, la masse présumée, à sec, est de 24,93 kg pour un panneau de copeaux orientés, et de 20,24 kg pour le contreplaqué. La masse d'humidité contenue, à sec, pour un taux de 25 %, est de 6,233 kg pour un panneau de copeaux orientés, et de 5,06 kg pour le contreplaqué (c'est-à-dire 1,17 kg moins d'eau).

Au terme de la période d'assèchement de cinq mois, à une pression neutre et sans vent, le contreplaqué était plus sec que le panneau de copeaux orientés, et le bois de charpente du mur contenant du contreplaqué était aussi plus sec. Par exemple, le bois de charpente utilisé dans le mur contenant du contreplaqué affichait des teneurs en humidité au niveau de la paroi et de l'âme, à mi-hauteur, de 12,13 et de 13,41 % respectivement. Par comparaison, la teneur en humidité du bois de charpente du mur revêtu de panneau de copeaux orientés était de 13,41 et de 14,48 % respectivement. Comme il y a davantage d'humidité à éliminer, il faut plus de temps pour atteindre des niveaux égaux. Compte tenu des propriétés de diffusion mentionnées au chapitre 8, il est probable que le mur de contreplaqué sèche plus rapidement avec la même teneur en humidité initiale. Le taux d'assèchement total apparent était de 0,0596 kg/semaine pour le mur revêtu de contreplaqué, et de 0,0557 kg/semaine pour le mur revêtu de panneaux de copeaux orientés.

Question 10 : Quel effet obtient-on en utilisant une ossature en 2 x 6 au lieu d'une ossature en 2 x 4?

Poser la question, c'est en partie y répondre. En effet, l'ossature contiendra 57 % plus d'humidité à cause du volume plus élevé de matériel. Comparer l'assèchement des murs en 2 x 4 (38 x 89 mm) avec les murs en 2 x 6 (38 x 189 mm) ne doit pas servir à établir la suprématie d'un type sur l'autre, mais plutôt à montrer le rendement d'une ossature fabriquée avec le matériau le plus grand. Aux fins de comparaison directe, la quantité d'humidité contenue par un mur en 2 x 6, si la source de cette humidité se situe à l'extérieur de la structure, ne doit pas être plus élevée que pour un mur dont l'ossature est en 2 x 4. Cette affirmation ne signifie pas qu'il suffit simplement de réduire le temps de trempage pour simuler ce cas avec un mur à ossature en 2 x 6. La distribution initiale réelle d'humidité dans les murs susceptibles de contenir des fuites est probablement influencée par la gravité. En outre, la portion inférieure des murs sera soumise à un stress plus grand que les portions supérieures.

Pour illustrer l'assèchement d'un mur à ossature en 2 x 6 qu'on a mouillé de la même manière que les murs à ossature en 2 x 4, nous utiliserons encore une fois l'exemple du mur d'essai S19-12. Seulement deux figures sont fournies. La figure

Figure 19. Assèchement des principaux éléments du mur S19-12, ossature en 2 x 6, 50 % d'humidité relative dans le caisson, revêtement de stucco conditionné à la même humidité relative

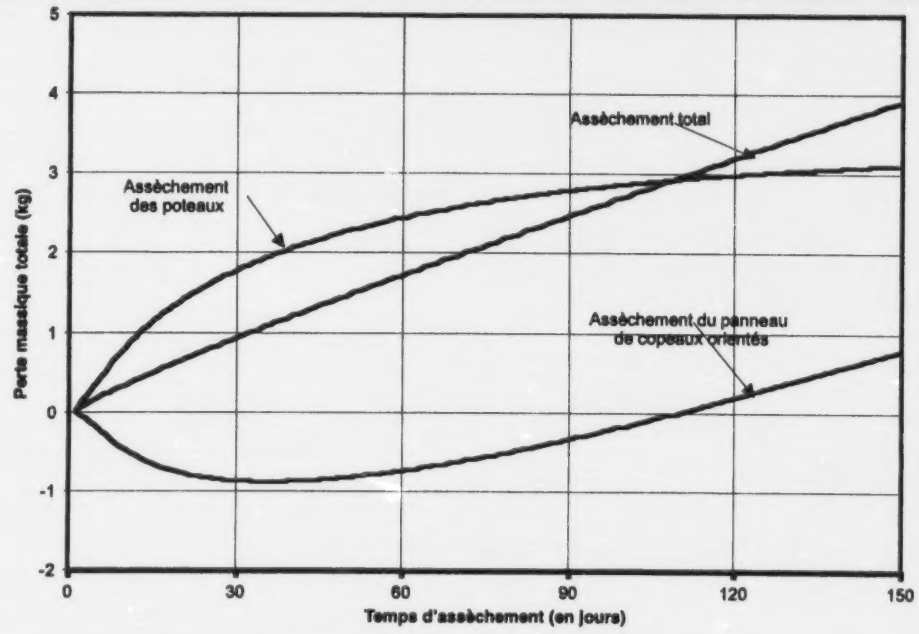
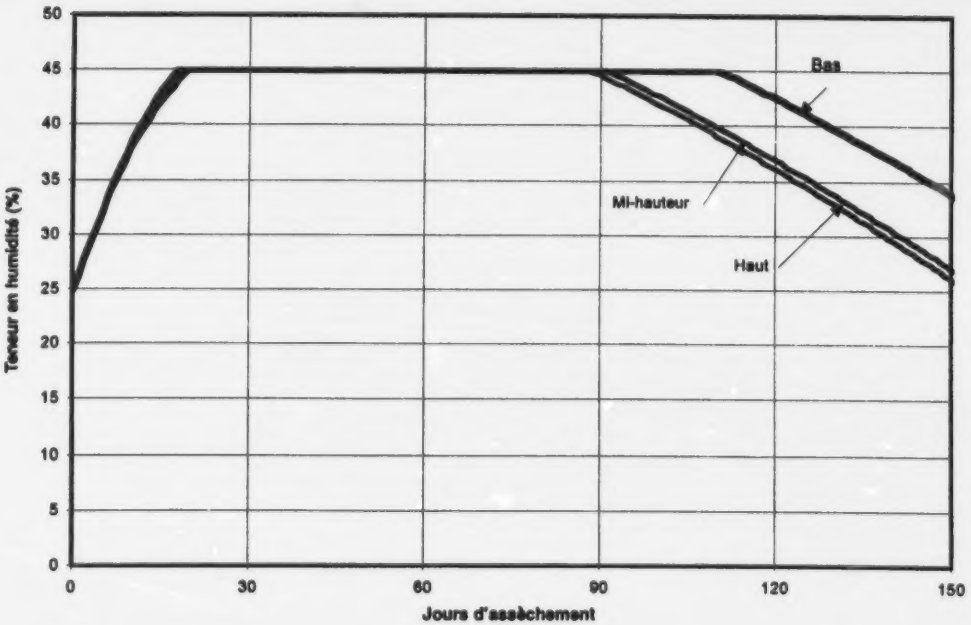


Figure 20. Accumulation d'humidité dans la couche intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, ossature en 2 x 6, teneur en humidité maximale de 45 %



19 montre la variation de poids totale parallèlement aux autres facteurs abordés au début du rapport. La perte d'humidité totale est plus grande étant donné qu'il y a plus d'humidité à éliminer et que le mur reste mouillé plus longtemps. En outre, le revêtement intermédiaire du mur est plus sensible dans des conditions d'humidité relative élevée. L'humidité totale a augmenté dans le panneau de copeaux orientés pendant environ 40 jours; il a fallu environ 110 jours pour que le panneau retrouve une humidité moyenne aussi élevée qu'à l'origine.

La figure 20 montre l'accumulation d'humidité sur la face intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés. Il s'agit du premier cas où la condensation s'est accumulée plus rapidement qu'elle ne pouvait s'éliminer sur la face intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés. Il s'agit aussi du premier cas où l'on a atteint le niveau de saturation prédéterminé de 45 %. Le drainage s'est effectué à l'intérieur du mur, le cas échéant.

Cet exemple attire l'attention sur un point mentionné au chapitre 4 concernant l'absence de capacité de transfert de la masse liquide du modèle. Si cette capacité avait été possible, un taux de transmission d'humidité plus élevé aurait été relevé, le cas échéant, et l'accumulation d'humidité aurait été plus faible. Dans cet exemple, on a aussi relevé la présence d'un artéfact au niveau du sous-programme sur le mouvement d'air, qu'on doit qualifier de « dérive » du critère de convergence du mouvement d'air. Cet artéfact a permis de converger vers une solution à de plus faibles vélocités pour l'extraction de l'air que pour son admission. Ce cas étant inconnu au début de la modification du programme, le problème n'a pas été résolu aux fins du présent rapport. Un survol des simulations accomplies plus tôt n'a révélé que quelques cas touchés de cette manière. Les résumés sur la perte d'humidité des cas touchés, semblables à ceux qui sont montrés à la figure 19, étaient tous conformes au rendement attendu. De plus, on ne croit pas que les conclusions tirées jusqu'ici puissent être faussées.

Question 11 : Quels sont les taux d'assèchement en l'absence de pare-vapeur en polyéthylène?

L'exemple utilisé pour illustrer les changements qui se produisent en l'absence de pare-vapeur en polyéthylène est celui du mur S19-12, avec l'orifice de ventilation supérieur entièrement fermé.

Les taux d'assèchement ont été beaucoup plus élevés. Les figures 21, 22, 23 et 24 montrent les taux d'assèchement globaux ainsi que les teneurs en humidité du bois d'ossature et des faces intérieures et extérieures du revêtement intermédiaire en panneaux de copeaux orientés. Les propriétés de la plaque de plâtre utilisée pour cette simulation ne prévoyaient pas la présence de peinture pare-vapeur sur la face intérieure. L'assèchement a été plus rapide dans ce cas que dans tous ceux qui ont été vérifiés jusqu'ici, ce qui ne signifie pas qu'il offrirait un rendement satisfaisant en présence de conditions de mouillage chroniques. À coup sûr, cette méthode où l'étanchéité à l'air est assurée par les plaques de plâtre offre aux constructeurs la possibilité d'éliminer une proportion importante de la charge due à l'humidité imputable à la construction. Dans les régions froides, l'application de la couche finale de peinture pare-vapeur doit être reportée suffisamment longtemps pour que l'humidité attribuable à la construction puisse s'échapper.

Rendement des murs de référence

Deux murs de référence ont été inclus dans le projet de l'EDRA. Ces simulations ont été accomplies pour comparer leur rendement avec les autres murs revêtus de stucco simulés dans le présent rapport. À ce stade-ci, il est utile de mentionner que le faible assèchement des murs de référence ou que la diminution de leur assèchement ne signifie pas qu'un tel rendement soit acceptable pour des murs de stucco. Le rendement historique acceptable des murs traditionnels est probablement moins attribuable aux matériaux utilisés qu'à la façon de construire les murs et les bâtiments.

Figure 21. Assèchement de chaque élément principal du mur S19-12, pare-vapeur de polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5° C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

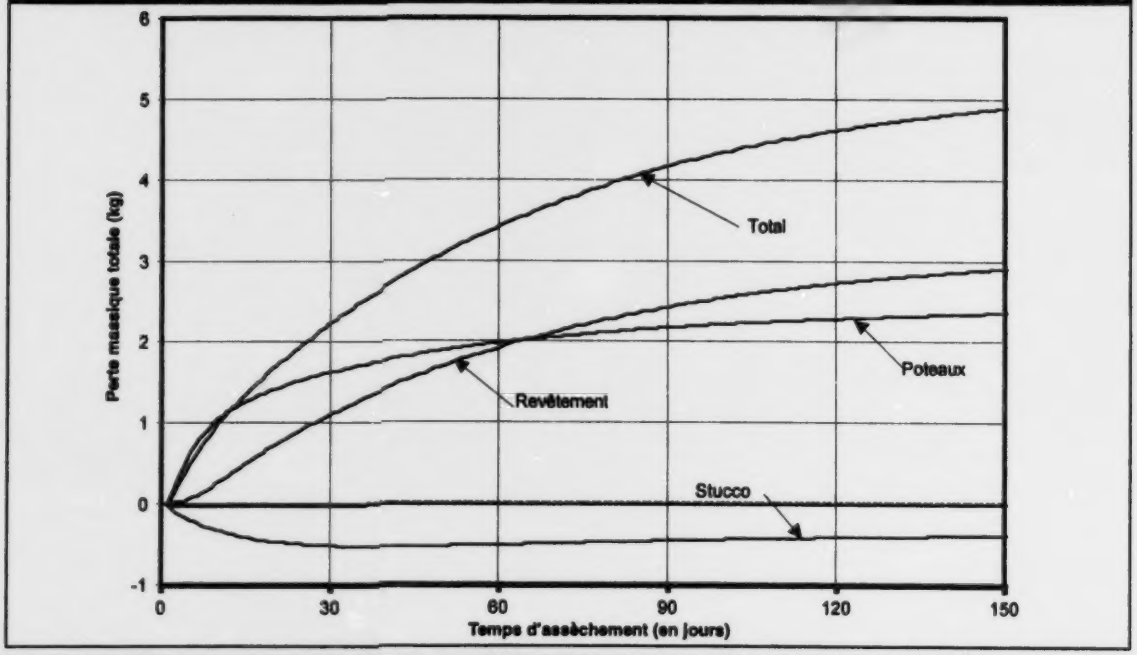


Figure 22. Assèchement de la paroi et de l'âme du bois d'ossature, mur S19-12, pare-vapeur de polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

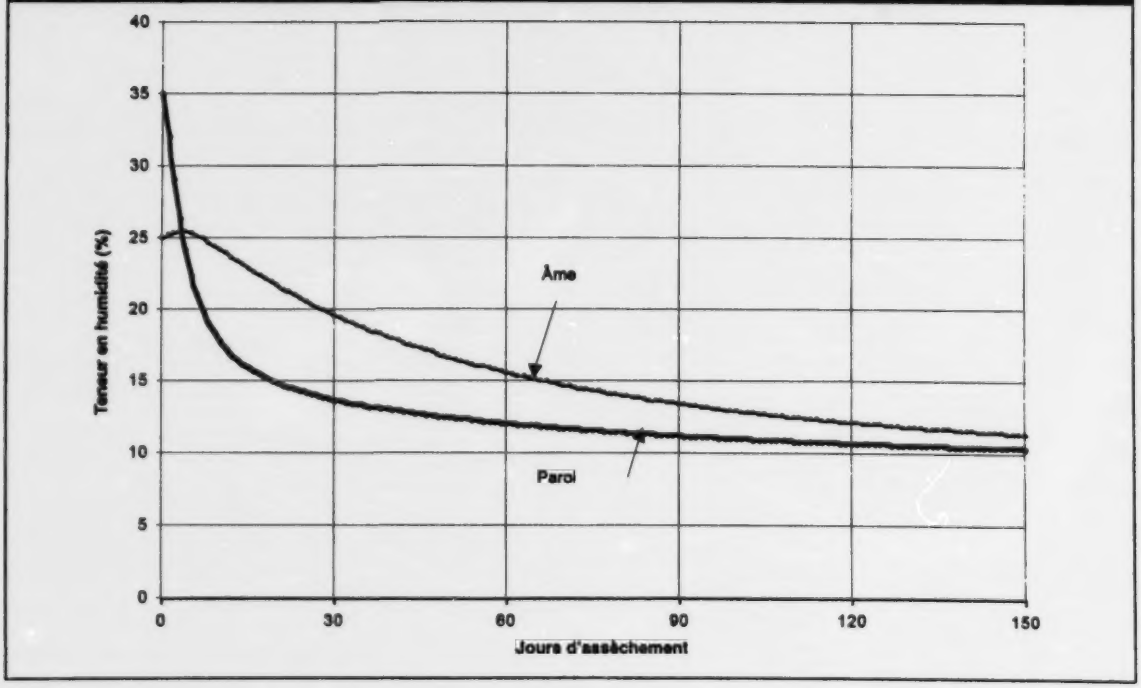


Figure 23. Courbe d'assèchement de la face intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 C dans le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative

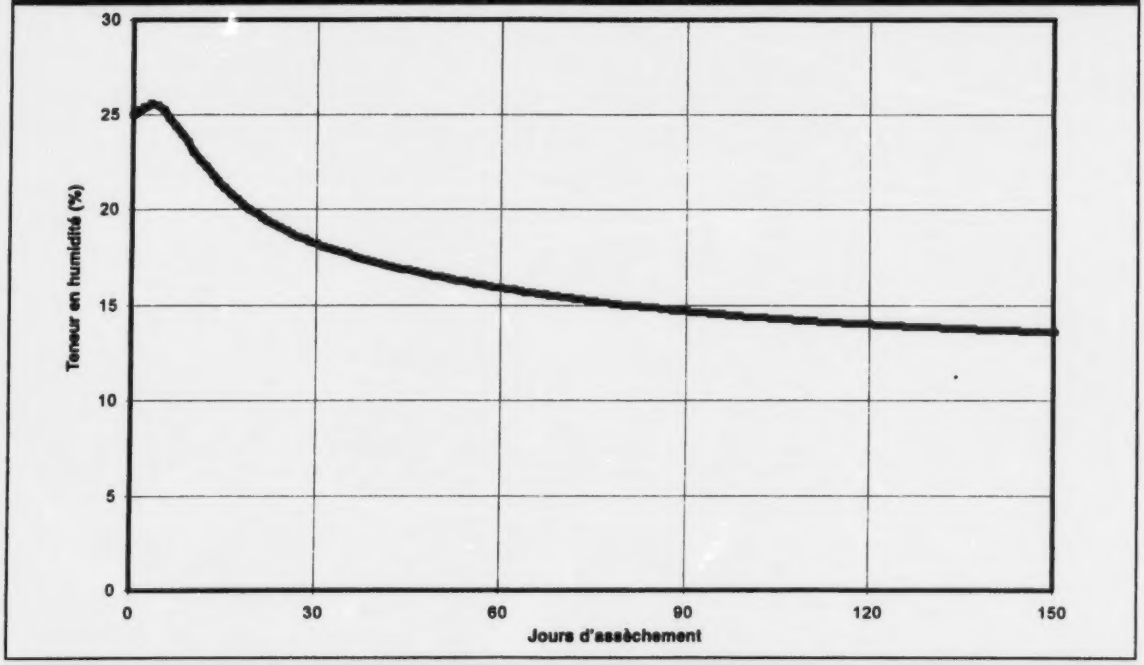
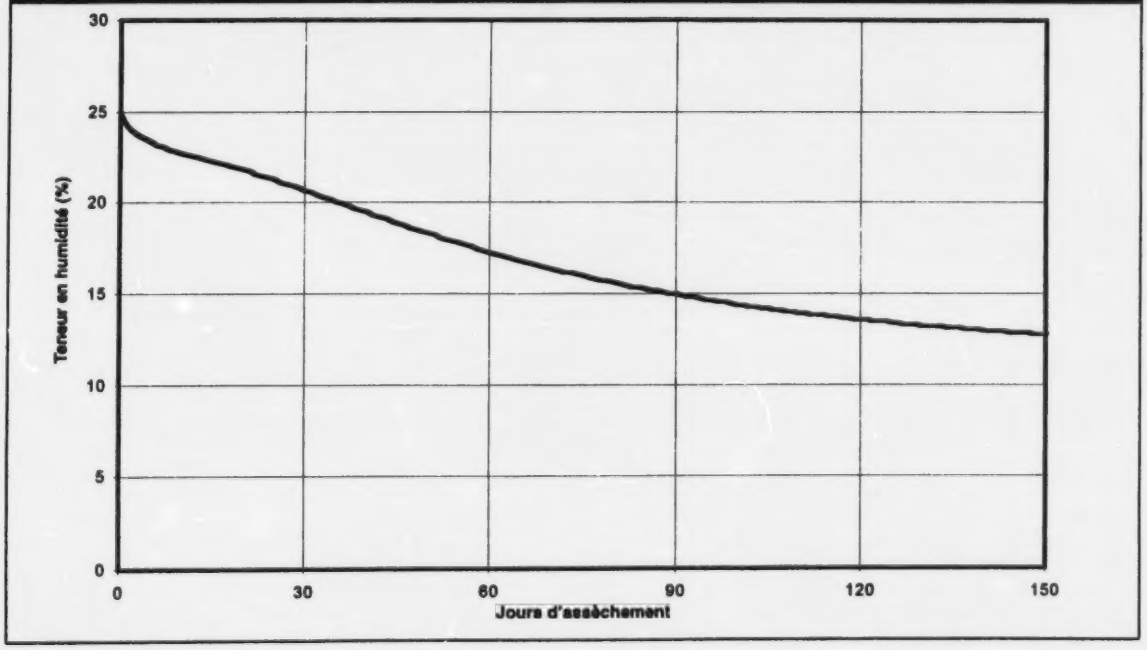


Figure 24. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, mur S19-12, polyéthylène enlevé, orifice de ventilation supérieur fermé, 70 % d'humidité relative et température de 5 C dan le caisson, stucco conditionné à 50 % d'humidité relative



Question 12 : Quel est le taux d'assèchement de deux murs de référence construits à l'aide de bardage en vinyle et en bois que l'on soumet à la même charge due à l'humidité que celle qui a été utilisée dans la présente étude paramétrique?

Pour cet examen, on a utilisé, à titre d'exemples, des fichiers établis dans les années 80 et présentant des caractéristiques pour les infiltrations d'air fondées sur des essais au banc effectués par RWDI (RWDI et Scanada, 1988; Rowan et al., 1988).

Dans le cas du bardage en vinyle, les résultats sont présentés à la figure 25 pour les pertes d'humidité globales. Le gain élevé d'humidité totale enregistré par le revêtement intermédiaire prouve hors de tout doute que l'humidité est restée élevée dans le mur pendant les cinq mois de simulation. L'examen des conditions d'humidité relative dans toutes les couches situées derrière le bardage a révélé un faible échange d'air.

Cependant, on a remarqué que les paramètres de fuite vers l'intérieur et vers l'extérieur précisés pour le haut et le bas du mur étaient les mêmes que dans le reste du mur. En pratique, on utilise normalement des bandes de départ au bas du mur. Cette mesure permet un certain mouvement d'air à ce niveau. Au haut du mur, d'autres détails d'exécution tiennent compte du tassement de la structure, empêchant ainsi le gondolement du bardage en plus de fournir un certain jeu. On ne disposait d'aucune information afin de préciser les caractéristiques du mouvement d'air se rapportant à ces détails. Il semble que les murs revêtus de vinyle soient mieux ventilés. Des informations sur les caractéristiques des fuites d'air par les joints du bardage en vinyle et sur d'autres détails d'exécution seraient utiles.

Enfin, on peut entendre le matériau battre lorsque le vent souffle directement sur les murs revêtus de vinyle ou le long de ceux-ci. Ce bruit indique qu'un certain pompage dynamique de l'air a lieu, lequel contribue à l'échange d'air dans l'espace situé derrière le bardage. Bien que la plupart des

Figure 25. Bardage en vinyle, assechement de chacun des éléments principaux. 70 % d'humidité relative et température de 5 C dans le caisson

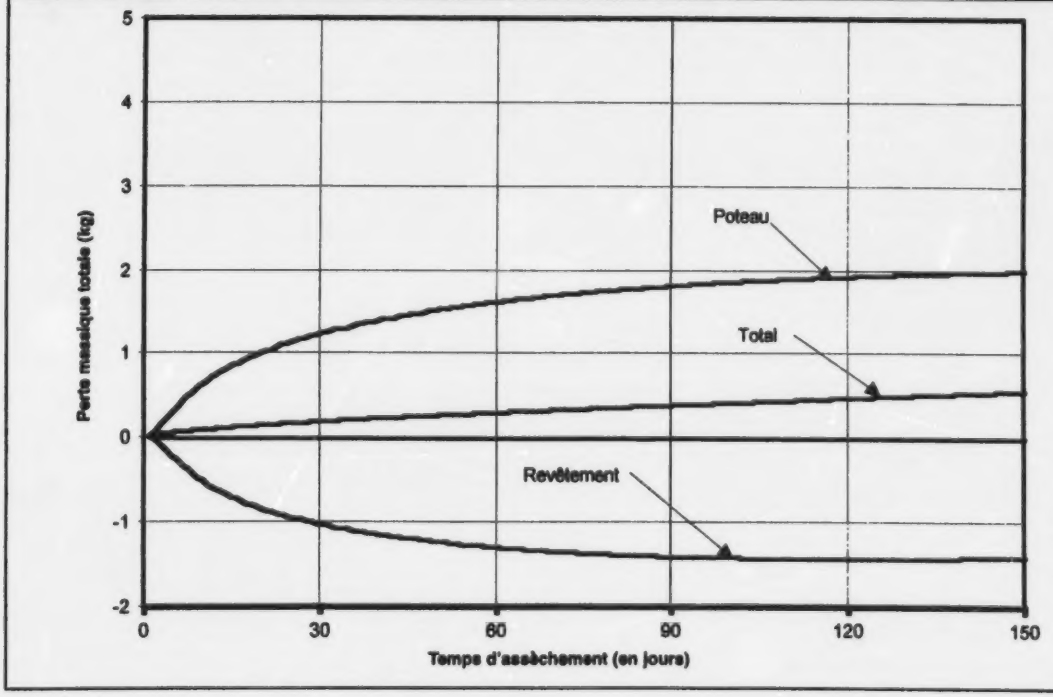
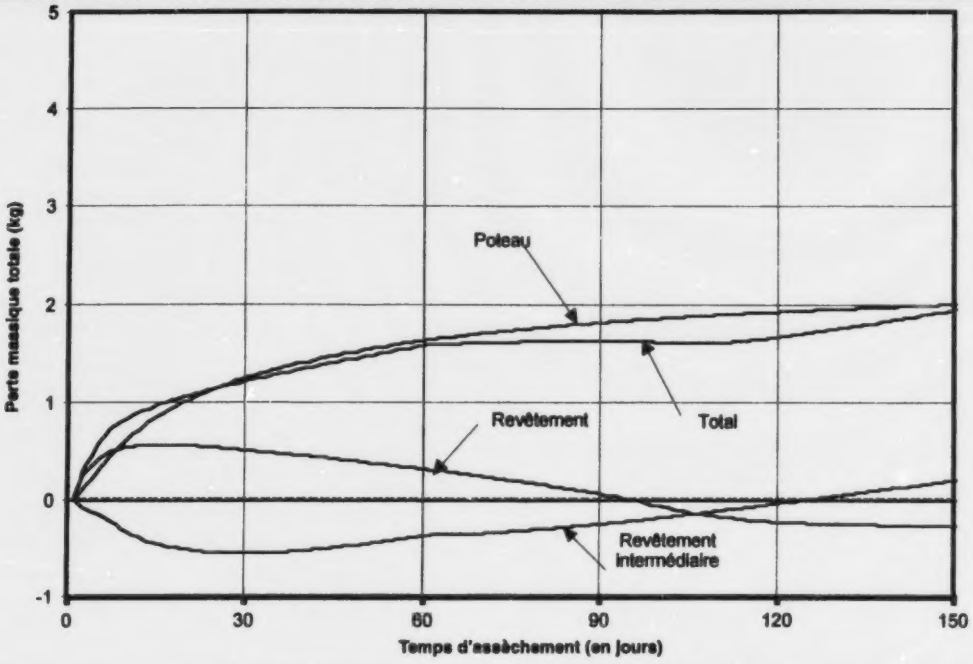


Figure 26. Assèchement de chacun des principaux elements du mur S19-12, pare-vapeur de polyethylene enlevé, orifice de ventilation superieur ferme, 70 °₀ d'humidité relative et temperature de 5 C dans le caisson, stucco conditionne a 50 °₀ d'humidité relative



modèles analytiques soient incapables de traiter ces effets dynamiques rapides, il est probablement possible d'établir les coefficients de débit en fonction de la vélocité du vent, de sa direction et du facteur de rafales, c'est-à-dire une fonction qui revient à la forme traditionnelle lorsque le vent est nul ou presque nul. Il faudrait procéder à des essais pour obtenir un rapport empirique sur ce type de construction.

À la figure 26, on présente les résultats des pertes d'humidité globales d'un mur revêtu de bardage en bois posé sans fourrures. Les faces exposées du bardage ont été recouvertes de peinture, et les faces arrières, d'apprêt. Une seule figure est présentée car il est possible de déduire la majorité du rendement du mur à l'aide de cette représentation graphique.

Au départ, le bardage en bois devait contenir 15 % d'humidité, ce qui est élevé pour un produit préfini et enduit d'un apprêt. En outre, il avait perdu une partie de son humidité, qu'il a cependant récupérée, à long terme. Ainsi, le bardage contenait plus d'humidité à la fin des cinq mois de simulation qu'au début. Le revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés a accumulé de l'humidité parce que celle-ci était redistribuée des poteaux. En fait, la face intérieure a affiché un taux d'humidité de 45 % pendant un court laps de temps. La perte d'humidité totale était faible, même par rapport aux murs revêtus de stucco. Les coefficients d'infiltration d'air incorporés à ce mur d'essai ne prévoient pas de fuite au niveau de la bande de départ, ni au haut du mur revêtu de bardage en bois. Seuls les coefficients représentant des bardages en bois étanches sont fournis. Ces résultats sont conformes aux attentes à l'effet que l'humidité accumulée causerait éventuellement le pelage de la peinture et une dégradation sérieuse du bardage.

Pour illustrer l'assèchement du mur dont le bardage est posé sur des fourrures, on suppose que les coefficients sont les mêmes au milieu du mur. Pour modéliser la cavité de ventilation, on suppose que le bardage a été posé sur des fourrures de 19 mm, avec un orifice de ventilation

inférieur de 12 mm et une réduction de 1 mm de l'orifice de ventilation supérieur. Les résultats ont été établis en fonction d'un caisson d'essais à 5 °C et à 70 % d'humidité relative. Le lecteur les trouvera aux figures 27, 28, 29, 30 et 31. Au début de la simulation, on a laissé le bardage atteindre les conditions d'équilibre du caisson d'essais, soit 70 % d'humidité relative.

Les courbes types de perte massique totale pour chacun des principaux éléments du mur sont montrées à la figure 27. La masse totale perdue était relativement élevée, et il semble que l'assèchement des poteaux et du revêtement intermédiaire soit adéquat.

Comme la cavité de ventilation et les jeux de ventilation prévus étaient suffisants, le mouvement d'air était constant à l'intérieur de la cavité de ventilation. La figure 28 montre la variation de l'humidité relative dans l'air contenu dans la cavité, de la partie inférieure à la partie supérieure du mur. L'air qui entre par le bas est légèrement plus chaud, et l'humidité relative diminue par rapport aux conditions du caisson d'essais (70 %). Plus l'air se déplace vers le haut du mur, plus il se réchauffe et plus le taux d'humidité relative diminue. Le taux d'humidité relative de l'air a augmenté au moment d'atteindre le haut du mur.

Les courbes d'assèchement de l'âme et des parois du bois d'ossature à la figure 29 montrent que la face du bois a séché rapidement, peut-être aussi vite que toute autre représentation graphique de ce type. L'humidité a d'abord dû se frayer un chemin vers l'extérieur à travers le revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, dont la teneur en humidité de la face intérieure est montrée à la figure 30. L'élément inférieur (lequel représente un neuvième de la hauteur du mur) a mis plus de temps à s'assécher que l'élément du milieu ou de la partie supérieure parce que la température de l'air était plus basse et que l'humidité relative était plus élevée au bas de la cavité de ventilation. Des variations semblables de la face extérieure sont montrées à

Figure 27. Assèchement de chacun des éléments principaux d'un mur dont le bardage en bois est posé sur des fourrures, cavité de ventilation de 19 mm, orifices de ventilation de 12 mm (inférieur) et de 1 mm (supérieur), 70 % d'humidité relative et température de 5 °C dans le caisson

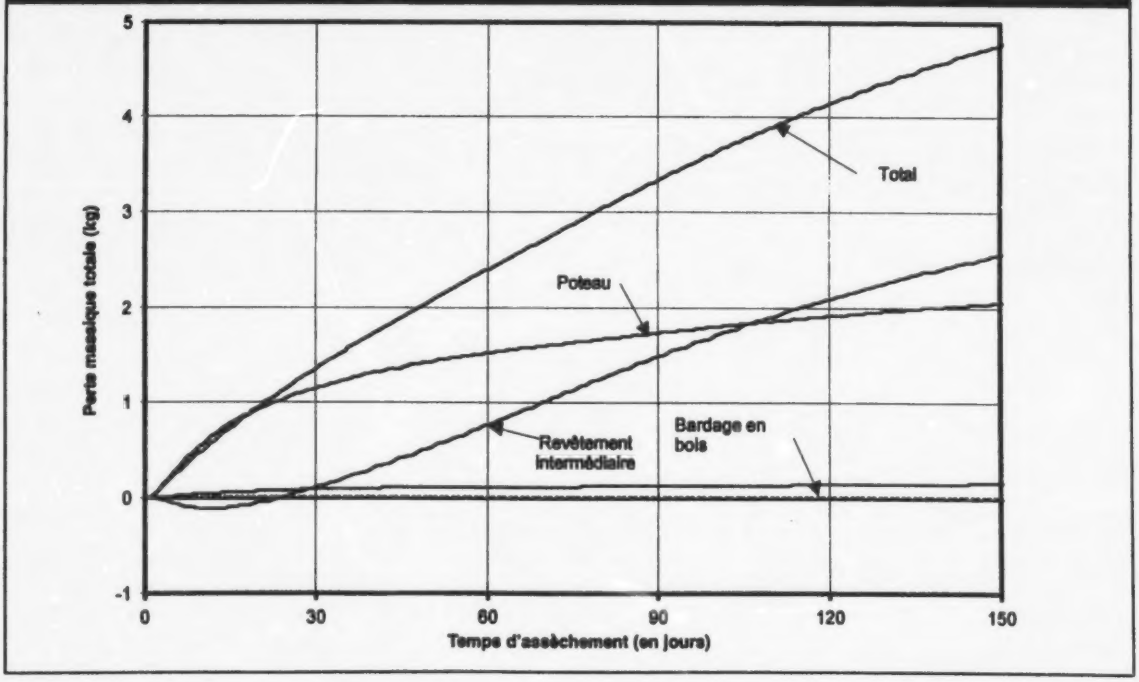


Figure 28. Humidité relative de l'air dans la cavité de ventilation, de bas en haut, 70 % d'humidité relative dans le caisson

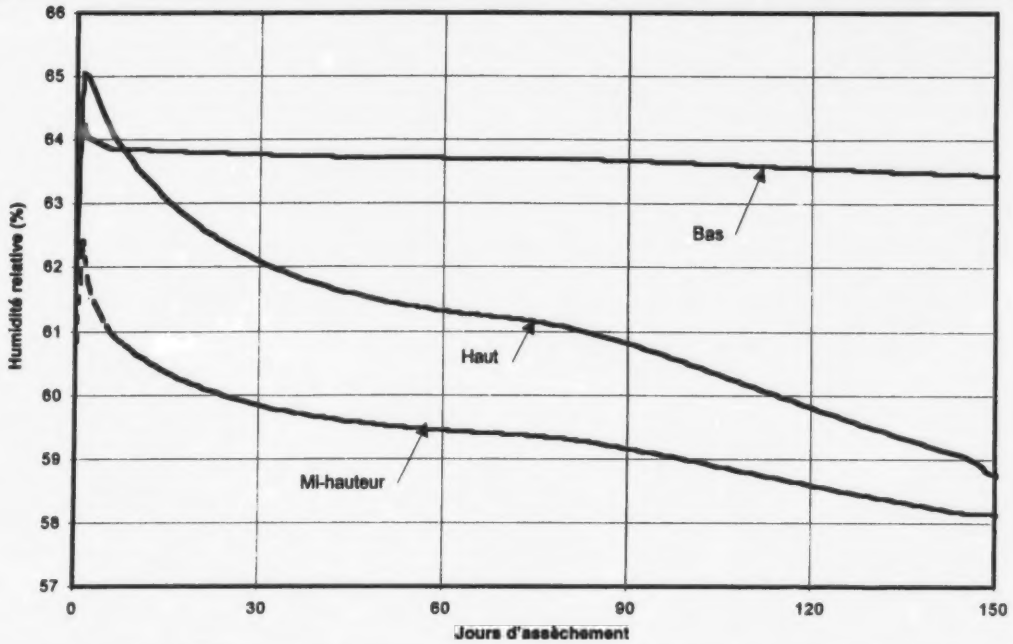


Figure 29. Assèchement de la paroi et de l'âme du bois d'ossature, bardage en bois posé sur des fourrures de 19 mm, orifices de ventilation de 12 mm (inférieur) et de 1 mm (supérieur)

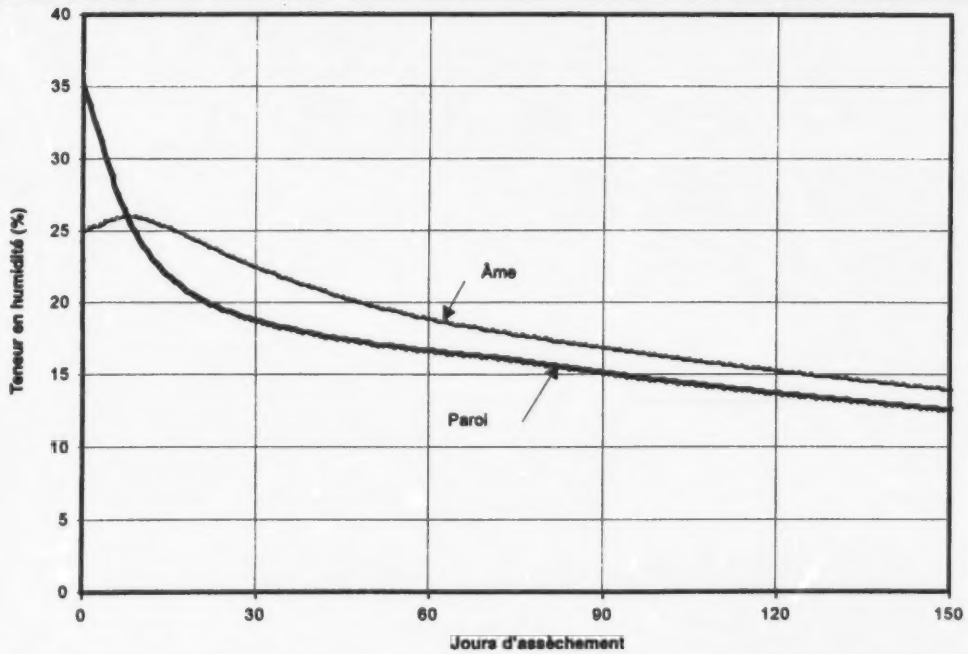


Figure 30. Courbe d'assèchement de la face intérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, bardage en bois, cavité de ventilation de 19 mm, orifices de ventilation de 12 mm (inférieur) et de 1 mm (supérieur)

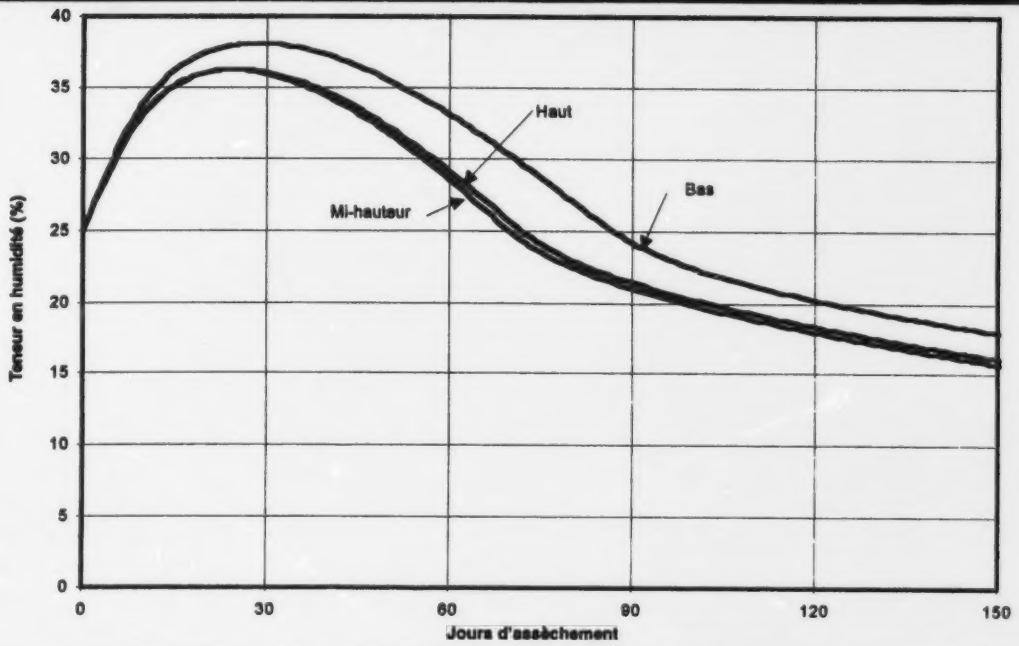
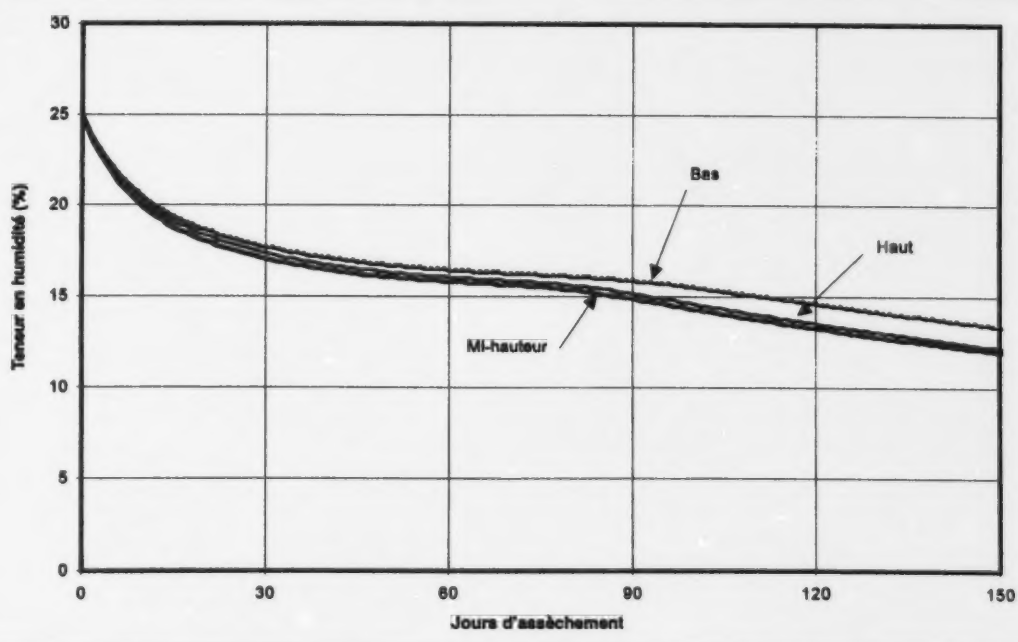


Figure 31. Assèchement de la couche extérieure du revêtement intermédiaire en panneau de copeaux orientés, bardage en bois, cavité de ventilation de 19 mm, orifices de ventilation de 12 mm (inférieur) et de 1 mm (supérieur)



la figure 31, sauf que les différences ne sont pas aussi marquées. Les variations de la teneur en humidité des autres portions du mur ne sont pas fournies. Malgré la présence de surfaces humides à l'intérieur du mur, le mouvement d'air dans la cavité de ventilation et par chaque recouvrement du bardage suffisait à maintenir l'équilibre de la teneur en humidité du bardage en bois à peu près au niveau initial, soit entre 11 et 12 %.

11. CONCLUSIONS

Cette étude paramétrique de l'assèchement des systèmes de revêtement mural en stucco a porté sur une variété de situations afin d'accroître nos connaissances sur les systèmes de ventilation des murs extérieurs. De plus, on a examiné d'autres questions reliées au programme expérimental de l'EDRA qui exposera plusieurs systèmes de mur à des conditions météorologiques en régime permanent.

Le principal objectif consistait à étudier les paramètres des cavités de ventilation des systèmes de mur en stucco à l'aide de WALLDRY, un programme informatique élaboré par la SCHL. On a saisi un nombre important de combinaisons de profondeurs de cavité de ventilation et de hauteurs de jeu de ventilation afin d'aider le comité directeur de l'EDRA à établir les paramètres finals des travaux de recherches. Le lecteur trouvera ci-après les conclusions de l'étude.

1. Le détail d'exécution qui influence le plus le taux d'assèchement est la profondeur de la cavité de ventilation située derrière le stucco. La hauteur du jeu de ventilation n'était pas aussi importante par rapport au taux d'élimination de l'humidité.

2. Les cas de stucco découplé (où l'on précisait que les propriétés du stucco n'étaient pas absorbantes) ont fourni la limite inférieure de la solution des taux d'assèchement pour l'investigation. Certains types de systèmes de stucco et de fond s'apparentent à ce cas. Les taux d'assèchement étaient plus faibles que ceux du stucco couplé au mur (c'est-à-dire lorsque les propriétés de la couche intérieure de stucco faisant face au mur étaient les mêmes que les propriétés de la couche extérieure).

3. À titre d'exemple, le cas de stucco découplé permettait la ventilation et la diffusion d'humidité. Toutefois, la pose du stucco directement sur le papier de construction et sur le revêtement intermédiaire en bois ne permettait à l'humidité de s'échapper du mur que par diffusion.

4. L'obturation de l'orifice de ventilation supérieur d'un mur de stucco ventilé ralentissait considérablement l'assèchement. Cependant, il a été démontré qu'une légère infiltration (par exemple, un jeu de ventilation de 1 mm) donnait des résultats à peu près comparables à ceux d'une cavité dotée d'orifices de ventilation supérieurs et inférieurs de dimension égale.

5. D'un point de vue expérimental, il a été démontré que la teneur en humidité du stucco au début de l'étude pouvait influencer l'interprétation des taux d'assèchement du mur de bois situé derrière. Cette situation s'explique par le fait que le stucco pouvait absorber ou désorber de grandes quantités d'humidité, selon l'équilibre atteint avant son exposition aux conditions du caisson d'essais. Autrement dit, la variation totale de poids d'un mur ne fournit pas toute l'information nécessaire pour déterminer la capacité d'assèchement de celui-ci.

6. La diminution de l'humidité relative à l'intérieur du caisson d'essais a accéléré l'assèchement du mur d'essais. Les conditions d'humidité relative ont varié entre 50 et 80 % afin de permettre à l'équipe de l'EDRA de décider si des changements s'imposaient au niveau des conditions prévues pour le caisson. Une évaluation paramétrique semblable a été effectuée pour la température du caisson d'essais.

7. L'absence de pare-vapeur de polyéthylène permettait un assèchement relativement rapide du mur. On a conclu, pour une charge unique due à l'humidité accumulée au moment de la construction, que cette mesure permettrait à l'assèchement de s'effectuer pendant les travaux,

pourvu que la couche de peinture finale ne soit pas appliquée avant l'élimination de l'humidité. L'assèchement d'un mur constamment mouillé est une question bien différente.

8. Le bardage en vinyle semblait retenir l'humidité dans le revêtement intermédiaire pendant une plus longue période que bien des murs de stucco couplé. Les caractéristiques du mouvement d'air dans le bardage étaient fondées sur les propriétés évaluées dans le cadre d'essais effectués sur de petits panneaux. Ces simulations n'incluaient pas les effets des bandes de départ ou des détails d'exécution au niveau de l'étanchéité des murs qu'on retrouve sur des bâtiments existants — des détails qui accélèrent l'assèchement des murs. On a suggéré qu'une certaine ventilation serait avantageuse pour ces murs. Les mécanismes de pompage reliés à la capacité du vent de fléchir le bardage en vinyle améliorent probablement la capacité d'assèchement des murs de ce type. Des recherches permettraient de déterminer les propriétés d'infiltration des joints des bardages en vinyle.

9. L'assèchement du mur dont le bardage en bois était posé sans fourrures s'est révélé aussi faible que celui du mur revêtu de vinyle. En outre, le contact direct avec le mur permettait au bardage d'accumuler l'humidité. On sait depuis longtemps que cette pratique mène à la dégradation du bardage et empêche l'assèchement du mur de fond.

10. L'assèchement était adéquat pour le mur dont le bardage de bois était posé sur des fourrures et qui était doté d'orifices de ventilation inférieurs ainsi que d'une ventilation supérieure limitée. La teneur en humidité du bardage en bois est restée relativement basse.

11. Le revêtement intermédiaire en bois a servi d'élément de contrôle du mouvement de l'humidité dans tous les essais paramétriques. Les propriétés du panneau de copeaux orientés ont été tirées de la documentation. Plus près de nous, des travaux non publiés laissent entendre que les propriétés du panneau de copeaux orientés varient beaucoup d'un fabricant à l'autre. Par conséquent, le type de revêtement intermédiaire en bois et son fabricant sont des points importants à considérer lors du choix des matériaux qui serviront aux travaux de recherches. Les propriétés doivent aussi être bien établies pour qu'on puisse faire des comparaisons à l'aide de simulations par ordinateur.

12. Le revêtement intermédiaire en contreplaqué possède une plus grande perméabilité que le panneau de copeaux orientés, compte tenu des valeurs de contrôle fournies dans la documentation. Les conditions d'humidité ayant été précisées en termes de poids volumique apparent, il n'est pas tout à fait approprié de les comparer. Cependant, on a conclu que le revêtement intermédiaire en contreplaqué sécherait probablement plus vite.

13. Dans le même esprit, une comparaison de l'assèchement des murs à ossature en 2 x 4 (38 x 89 mm) avec celle des murs à ossature en 2 x 6 (38 x 140 mm) est compliquée par la différence de volume total de bois d'ossature et d'humidité totale contenue dans le bois aux mêmes conditions initiales de teneur en humidité. Cette comparaison est de mise pour comparer l'humidité de construction. Dans ce cas-ci, on a démontré que des volumes d'eau beaucoup plus élevés devaient être dissipés, et que la concentration d'humidité dans le revêtement intermédiaire était plus élevée.

14. La teneur en humidité du bois d'ossature peut varier rapidement au début de l'expérience : c'est pourquoi il faut pouvoir établir les gradients d'humidité initiaux du bois. La variation d'humidité entre la partie supérieure et la partie inférieure du mur ne devrait pas être très grande dans le bois d'ossature. Cependant, l'assèchement de la lisse basse devrait être lent. Cet aspect n'a pas fait l'objet d'une modélisation précise dans la présente étude. Cependant, les gradients de température relevés dans l'étude par suite du mouvement de l'air derrière le revêtement en stucco nous permettent d'affirmer que la

partie inférieure des murs d'essai séchera plus lentement que la partie supérieure.

15. Les gradients d'humidité d'une face à l'autre du revêtement intermédiaire seront élevés. On relèvera aussi des gradients d'humidité verticaux dans le revêtement intermédiaire à cause de la façon dont l'humidité s'échappe au haut de l'espace de ventilation, le cas échéant.

16. La teneur en humidité et les propriétés d'absorption du stucco influencent grandement les mesures de poids des murs d'essai. Toute fluctuation des conditions à l'intérieur du caisson d'essais qui touche l'absorption et la désorption d'humidité par le stucco peut annuler les changements de teneur en humidité du bois d'ossature et du revêtement intermédiaire des murs d'essai. Dans le cas présent, les tentatives de simulation des effets solaires provoqueront un assèchement plus rapide des murs, mais elles complexifieront la redistribution de l'humidité. Il faudrait que ce facteur soit contrôlé adéquatement pour permettre la comparaison à l'aide de simulations par ordinateurs et l'attribution de changements de poids adéquats à la redistribution. Il faudra aussi disposer de tous les instruments nécessaires pour évaluer la quantité d'humidité qui s'échappe réellement des éléments en bois du mur.

17. L'application d'un vent simulé de vitesse modérée et dirigé vers les murs d'essai, à l'intérieur du caisson, a accéléré le refroidissement des parties extérieures des murs d'essai. Il en a résulté une baisse du taux d'élimination de l'humidité par la ventilation. Le changement était faible et dépendait en grande partie des caractéristiques du mouvement d'air dans la cavité de ventilation ainsi que des jeux de ventilation utilisés.

12. SOMMAIRE

L'étude paramétrique entreprise a fourni quelques réponses aux questions que l'on pourrait se poser sur le rendement des murs d'essai soumis à des conditions d'assèchement en caisson d'essais. Les éléments importants qui doivent être suivis adéquatement afin de comprendre le rendement par rapport à l'humidité des murs d'essai ont été décrits. En outre, l'ordre de grandeur des effets et les taux d'assèchement devraient contribuer à la planification finale du programme de recherches de l'EDRA. Les propriétés réelles des matériaux choisis auront une grande importance. L'expérience peut servir à valider des modèles informatiques pourvu que des informations détaillées aient été recueillies sur la distribution de l'humidité. C'est à ce moment-là seulement que nous pourrons établir les faiblesses de la modélisation.

13. RECOMMANDATIONS POUR LES PROCHAINES ÉTUDES

Les propriétés du revêtement de stucco intégrées à la base de données WALLDRY étaient fondées sur des essais préliminaires accomplis par l'IRC. Il a été nécessaire de consulter les scientifiques de l'IRC pour que les suppositions formulées sur les propriétés s'apparentent aux conditions sur le terrain et pour que les simulations par ordinateur proposées soient aussi réalistes que possible.

En présence de conditions météorologiques réelles accompagnées d'ensoleillement et de températures variables, il est possible que le classement relatif des murs, selon leur capacité d'assèchement établie en laboratoire et en régime permanent, ne tienne pas. Cette possibilité devra être évaluée au moyen de la modélisation informatique de murs contenant des matériaux possédant les mêmes propriétés et qu'on assujettira aux mêmes conditions limites initiales en se servant de données météorologiques réelles en parallèle avec des essais en laboratoire en régime permanent. Toute modification sérieuse du classement remettrait en question la pertinence des essais en laboratoire. Cependant, on pourrait aussi en déduire qu'il est possible de modifier les protocoles en laboratoire afin de mieux simuler certains des effets qui contribuent à l'élimination de l'humidité contenue dans des murs réels.

Actuellement, le modèle informatique WALLDRY ne comprend pas le transfert de la masse liquide. L'expansion de sa capacité de modélisation afin d'inclure ce mécanisme de transfert d'humidité semble justifiée. Dans sa forme actuelle, le modèle informatique ne se prête pas d'emblée à un usage par le profane étant donné que la version conviviale initiale n'était pas fonctionnelle. La taille du programme excédait la capacité du compilateur QuickBasic. Il est probablement justifié de charger le programme dans un compilateur plus puissant, surtout à cause du fait qu'il pourrait servir à évaluer le rendement des murs dans le cadre du prochain programme expérimental.

On a relevé que le mouvement d'air était instable pendant certaines simulations. Ce fait n'est pas totalement surprenant, que ce soit au niveau pratique ou au niveau de la méthode de la solution itérative. Or, nous avons été davantage préoccupés par la « dérive » de la solution pour la vélocité du mouvement d'air qui ne correspondait pas, dans certains cas, au rendement attendu. Cet artéfact doit être corrigé. Pour y parvenir et évaluer d'autres approximations du programme, il faudrait comparer les prédictions de WALLDRY avec celles de LATENITE, un modèle plus précis.

Bien que les simulations décrites dans le présent rapport correspondent aux idées préconçues sur le rendement des murs sous diverses conditions, seules des vérifications nous permettront d'évaluer les faiblesses d'un modèle et de l'améliorer. Les conclusions présentées ici visent à guider les expériences sur des paramètres suffisamment différents pour être incorporés à un programme expérimental.

Ainsi, le présent rapport n'a pas pour but de recommander quel système de mur mérite d'être soumis à des études en laboratoire. Cette décision découlera de l'étude du rapport et elle tiendra compte des préoccupations du consortium de l'EDRA ainsi que de l'importance des ressources affectées aux travaux. La principale recommandation que l'on ose formuler est la suivante : la compréhension du rendement des murs d'essai doit s'appuyer sur la connaissance des propriétés physiques des matériaux employés et sur la mesure de ces propriétés au cours du programme d'essai. La connaissance des conditions limites initiales et des caractéristiques du mouvement d'air est importante afin de comprendre le rendement des murs en laboratoire. Cette information est aussi utile pour extrapoler le rendement des murs d'essai sous différentes conditions réelles.

Annexe A

ANNEXE A : FICHIER ENTRÉE TYPE D'UN MUR

S19-05
ÉTUDE DE LA SCHL - MURS DE STUCCO CONTENANT DES CAVITÉS - VANCOUVER

NOMBRE DE RANGÉES DE BARDAGE SUR LE MUR (NV) ET DE COUCHES DANS LE MUR (NE)
9 20

NOMBRE DE COUCHES DE REVÊTEMENT INTERMÉDIAIRE : 2 OU 3 (2 SI LE MATÉRIAU EST LÉGER, 3 S'IL EST LOURD)
3
W
Y
Y
W
Y
Y

SÉLECTION DES MATÉRIAUX POUR CHAQUE COUCHE (VOIR LA BASE DE DONNÉES SUR LES PROPRIÉTÉS POUR LE NOMBRE)
1
15
28
28
28
4
5
4
6
6
11
11
11
17
17
17
19
21
4
9

ÉPAISSEUR DE CHAQUE COUCHE (en m)
1
.002
.005
.011
.005
.001
.019
.001
.0005
.0005
.003
.0065
.003
2.966667E-02
2.966667E-02
2.966667E-02
.000127
.0127
.002
1

SÉLECTION DE MATÉRIAUX POUR LES COUCHES DES POTEAUX (VOIR LA BASE DE DONNÉES SUR LES PROPRIÉTÉS POUR LE NOMBRE)
18
18

ÉPAISSEUR LATÉRALE DES COUCHES DES POTEAUX
.019
.019

TENEUR EN HUMIDITÉ INITIALE (%) : BARDAGE, REVÊTEMENT INTERMÉDIAIRE, POTEAUX
1 25 35

HAUTEUR DU MUR (m), LONGUEUR DU MUR (m), NOMBRE DE POTEAUX PLEINE GRANDEUR ÉQUIVALENTS, EMPLACEMENT DES COUCHES DES POTEAUX
2.44 1.22 5 15

Caractéristiques des jeux dans le bardage : K_1 (Pa/(L/min)/m)) | de bas en haut (9 éléments + ouverture)
5.205040673414866D-06
10000
10000
10000
10000
10000
10000
10000
10000
7.738374670346578D-06

Caractéristiques des jeux dans le bardage : K_2 (Pa/((L/min)/m)²) | de bas en haut (9 + ouverture)
5.205041E-06
10000
10000
10000
10000
10000
10000
10000
7.738375E-06

Caractéristiques de la lame d'air derrière le bardage : K_1 (Pa/jeu)/(L/min/m)) | de bas en haut (9 éléments + ouverture)
1.769700050354004D-04
1.769700050354004D-04
1.769700050354004D-04
1.769700050354004D-04
1.769700050354004D-04
1.769700050354004D-04
1.769700050354004D-04
1.769700050354004D-04
1.769700050354004D-04

Caractéristiques de la lame d'air derrière le bardage : K_2 (Pa/jeu)/(L/min/m)²) | de bas en haut (9 + ouverture)
1.7697E-07
1.7697E-07
1.7697E-07
1.7697E-07
1.7697E-07
1.7697E-07
1.7697E-07
1.7697E-07
1.7697E-07

INFILTRATION : NOMBRE D'ÉLÉMENTS (0 S'IL N'Y EN A AUCUN), ORIENTATION DES PRINCIPALES INFILTRATIONS, TEMPÉRATURE INTÉRIEURE ET HUMIDITÉ RELATIVE EN HIVER ET EN ÉTÉ
0 360 20 20 40 40

NOMBRE DE LAMES D'AIR
7

(+/- 45) COEFFICIENTS DE PRESSION DU VENT | de bas en haut (9 éléments + ouverture)
45
.2
.15
.12
.1
.095
.09
.1
.15
.21
.32

(+/- 90) COEFFICIENTS DE PRESSION DU VENT | de bas en haut (9 éléments + ouverture)
90
.02
-.005
-.0225
-.0475
-.0475
-.055
-.06
-.035
-.02
.03

(+/- 135) COEFFICIENTS DE PRESSION DU VENT | de bas en haut (9 éléments + ouverture)
135
-.16

-.16
-.165
-.175
-.19
-.2
-.22
-.23
-.25
-.26

(AUTRES DIRECTIONS) COEFFICIENTS DE PRESSION DU VENT | de bas en haut
(9 éléments + ouverture)
180
-.18
-.17
-.16
-.15
-.15
-.155
-.155
-.16
-.15
-.14

ORIENTATION DU MUR (EN DEGRÉS PAR RAPPORT AU NORD): N : 360, E : 90, S : 180, O : 270
180

IMPORTANCE DE LA SOURCE D'HUMIDITÉ EN kg/h, ET EMPLACEMENT : NOMBRE DE COUCHES ET D'ÉLÉMENTS
0 10 6

ÉPAISSEUR INITIALE DE LA PELLICULE D'EAU EMPRISONNÉE ENTRE LE PAPIER DE REVÊTEMENT INTERMÉDIAIRE ET LE REVÊTEMENT INTERMÉDIAIRE
0

NOMBRE DE COUCHES EXPOSÉES À L'AIR (OU À L'ISOLANT), PRÉCISER
8
3
5
9
10
11
13
17
21

DÉBUT ET FIN DE LA SIMULATION (DATE)
1 1 160 24

NOMBRE D'ITÉRATIONS ENTRE LES TROIS PRINCIPAUX SOUS-MODÈLES
3

NOMBRE DE COUCHES MONTRÉES À L'ÉCRAN (MAX. DE 12); PRÉCISER LE NOMBRE DE COUCHES
12
1
2
3
5
6
7
11
12
13
21
22
20

EMPLACEMENT DANS LA VILLE (1 - 10) VOIR MANUEL
1

NOM DU FICHIER SORTIE AUX FINS DE REPRÉSENTATION GRAPHIQUE ET DE MISE EN TABLEAUX (p. ex. GRAPH.PRN)
S19-05.PRN
S19-05.SUM

ÉQUATION SUR L'ÉTANCHÉITÉ DU BARDAGE, COEFFICIENTS DE DÉBIT ET EXPOSANTS
3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

CONTRÔLES DES GRAPHIQUES ET DES MISES EN TABLEAUX
D
D
5 13 21 1 1 1
11 1
11 5
11 9

```
13  1
13  5
13  9
21  5
22  5
3  5
5  5
3
```

Annexe B

ANNEXE B : FICHIER ENTRÉE TYPE DE DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

FICHIER DE DONNÉES
MÉTÉOROLOGIQUES EN LABORATOIRE
POUR LES SIMULATIONS DE VANCOUVER

Poteau initial (Teneur en humidité, éléments 1 à 9)
35 35 35 35 35 35 35 35 35

Caractéristiques des infiltrations -
(formule Q = C dP^n), C est dans (L/s)
0.0357 0.7

Efficacité du transfert des infiltrations et des exfiltrations de condensation
20 20

Champ d'influence (J 1 à 9) - Exfiltrations d'air / Infiltrations d'air
1 1 1 0 0 0 0 0 0
1 1 1 1 1 1 1 1 1

Nombre d'heures, 192
Heure Te Ti H.R.e H.R.i Pression Vélocité du vent Direction du vent
1 5 20 70 40 0 0 0
2 5 20 70 40 0 0 0
3 5 20 70 40 0 0 0
4 5 20 70 40 0 0 0
5 5 20 70 40 0 0 0
6 5 20 70 40 0 0 0
7 5 20 70 40 0 0 0
8 5 20 70 40 0 0 0
9 5 20 70 40 0 0 0
10 5 20 70 40 0 0 0
11 5 20 70 40 0 0 0
12 5 20 70 40 0 0 0
13 5 20 70 40 0 0 0
14 5 20 70 40 0 0 0
15 5 20 70 40 0 0 0
16 5 20 70 40 0 0 0
17 5 20 70 40 0 0 0
18 5 20 70 40 0 0 0
19 5 20 70 40 0 0 0
20 5 20 70 40 0 0 0
21 5 20 70 40 0 0 0
22 5 20 70 40 0 0 0
23 5 20 70 40 0 0 0
24 5 20 70 40 0 0 0
25 5 20 70 40 0 0 0
26 5 20 70 40 0 0 0
27 5 20 70 40 0 0 0
28 5 20 70 40 0 0 0
29 5 20 70 40 0 0 0
30 5 20 70 40 0 0 0
31 5 20 70 40 0 0 0
32 5 20 70 40 0 0 0
33 5 20 70 40 0 0 0
34 5 20 70 40 0 0 0
35 5 20 70 40 0 0 0
36 5 20 70 40 0 0 0
. . . . . .
etc.....

Annexe C

ANNEXE C : BASE DE DONNÉES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX - PROPS.DAT

33, 7, 40, 40
NOM
DENSITÉ (kg/m³)
CHALEUR MASSIQUE (W.s)/(kg.K)
RÉSISTIVITÉ THERMIQUE ((m².C)/W)/m
RÉSISTIVITÉ DE LA
DIFFUSION((Pa.m².s)/kg)/m
ABSORPTION D'EAU MAXIMALE (% DE
TENEUR EN HUMIDITÉ SELON LE POIDS)
CATÉGORIE (1-AIR/2-EAU/3-BOIS/4-AUTRE)
AIR EXTÉRIEUR
1.21
1,005
0
5.7E9
0
1
VAPEUR D'EAU
.598
2,050
18.
0
0
1
EAU LIQUIDE
998
4,180
1.66
0
0
2
PELLICULE D'AIR INTÉRIEURE
1.21
1,005
60
5.7E9
0
1
LAME D'AIR
1.21
1,005
15
5 7E9
0
1
REVÊTEMENT INTERMÉDIAIRE EN PAPIER
320
1,200
10
6.5E11
25
3
REVÊTEMENT INTERMÉDIAIRE EN
PANNEAU DE FIBRES DUR
352
1,300
16.5
20E9
120
3
« STYROFOAM - SM »
30
1,000
35
1E12
30
4
AIR INTÉRIEUR
1.21
1,005
0
5.7E9
0
1
CONTREPLAQUÉ (SAPIN DE DOUGLAS)
544
1,220
8.7
3906E9
60
3
PANNEAU DE COPEAUX ORIENTÉS
670
1,300
7.4
0.8E12
45
3

ISOLANT DE FIBRES DE VERRE MI-RIGIDE
100
960
30.5
5.9E9
30
4
BARDAGE EN PANNEAU DE FIBRES DUR
800
1,300
10.7
503E9
40
3
BARDAGE EN MÉTAL
2,740
896
.004
1E20
10
2
PELLICULE D'AIR EXTÉRIEURE
1.21
1,005
15
5.7E9
0
1
BARDAGE À BASE DE BOIS
544
1,170
11.9
800E9
60
3
NATTES ISOLANTES (_)
25
657
13
5.9E9
30
4
POTEAU EN BOIS
375
1,200
9.1
800E9
60
3
POLYÉTHYLÈNE
920
0
3
2.1E16
1
4
BARDAGE EN BOIS PEINT
544
1,170
11.9
3E12
30
3
PLAQUE DE PLÂTRE
1,200
1,080
2.33
15.75E9
280
4
POLYOLÉFINE
533
1,300
10
4.44E12
2
4
BARDAGE EN PANNEAU DE FIBRES DUR (S)
800
1,300
10.7
18E9
40
3
REVÊTEMENT INTERMÉDIAIRE EN PANNEAU DE FIBRES DUR (S)
352
1,300
16.5
6.6E9
120
3
BARDAGE EN VINYLE
620
946
6.2
.2E15

2
4
PLANCHE À BAGUETTE (TYPE 2)
29
1,000
28
.32E12
33
4
BRIQUE
1,970
800
1.43
.2E12
20
4
STUCCO (NON REVÊTU)
2,000
700
1
2.1E11
2
4
STUCCO (ACRYLIQUE)
900
0
4
2E14
1
4
STUCCO (À SUPPORT DE PAPIER)
190
1,200
10
6.5E11
40
4
STUCCO (À SUPPORT EN CONTREPLAQUÉ)
550
1,220
8.7
3906E9
60
3
STUCCO (GÉOTEXTILE)
100
500
500
9E9
120
4

BIBLIOGRAPHIE

BURCH, D., G. TSONGAS, C. ROSS et M. CUNNINGHAM. *A Parametric Study of Wall Moisture Contents Using A Revised Variable Relative Humidity Version of the Moist 2 Transient Heat and Moisture Transport Model, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI*, du 4 au 8 décembre, 1995.

BURCH, D.M., et W.C. THOMAS. *MOIST: A PC Program for Predicting Heat and Moisture Transfer in Building Envelopes, Release 2.0.*, NIST Special Publication 853, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., 1993.

BURCH, D.M., W.C. THOMAS et A.H. FANNEY. *Water Vapor Permeability Measurements of Common Building Materials*, ASHRAE Transactions V98, Pt. 2, 1992.

BURNETT, E., et J. STRAUBE. *Vents, Ventilation Drying and Pressure Modification*, Building Engineering Group (BEG), University of Waterloo, préparé pour la SCHL, décembre 1995.

DMO ASSOCIATES. *Review of CMHC Research Proposal to Address Building Envelope Failures in Lower Mainland British Columbia*, rapport présenté à la SCHL, 1997.

ETHERIDGE, D.W. « Crack flow equations and scale effect », *Building and Environment*, vol. 2, 1977, p. 181-189.

GALBRAITH, G.H., et R.C. MCLEAN. « Interstitial Condensation and the Valour Permeability of Building Materials », *Energy in Buildings*, vol. 14, 1990, p. 193-196.

GUSDORF, J. *Report on Documentation of the CMHC WALLDRY and WALLFEM Programs*, 1998.

HAZELDEN, D.G. *Development of a quality assurance protocol for the exterior envelope of wood frame multi-residential buildings*, ébauche, appel de propositions de la SCHL, 1997a.

HAZELDEN, D.G. *Enveloppe de bâtiments à ossature de bois dans le climat littoral de la Colombie-Britannique*, Bureau régional de la C.-B. et du Yukon, SCHL, 1997b.

HOPKINS, L.P., et B. HANSFORD. « Airflow through cracks », *Building Services Engineer*, vol. 42, 1974, p. 123-131.

MCLEAN, R.C., G.H. GALBRAITH et C.H. SANDERS. « Moisture Transmission Testing of Building Materials and the Presentation of Vapour Permeability Values », *Building Research and Practice*, The Journal of CIB, 1990, p. 82-91.

MORRISON HERSHFIELD LIMITED. *Modifications to the WALLDRY Program and Experimental Verification*, rapport à la SCHL n° 39165.OR-2, le 30 mars 1991a.

MORRISON HERSHFIELD LIMITED. *Essai en laboratoire sur l'assèchement des murs à ossature de bois et comparaison avec les simulations du logiciel WALLDRY (version 1986 modifiée)*, rapport final à la SCHL n° 39165.OR/4, le 25 septembre 1991b.

ONYSKO, D.M. *Moisture/Thermal Performance of Walls as Affected by Air Tightness*, projet 31-10C-021. Forestry Canada No. 6, Forintek Canada Corp., Ottawa, 1993.

ONYSKO, D.M., et S.K. JONES. *Air tightness of one type of hardboard siding*, projet 43-10C-016, CFS No. 15. Forintek Canada Corp., Ottawa, 1988a.

ONYSKO, D.M., et S.K. JONES. *Development of vapour permeability data for waferboard*, Forintek Canada Corp., Contract Report 43-59M-519, préparé pour la SCHL, Ottawa, 1988b.

PIGEON, M., et R. PLEAU. « Durability of Concrete in Cold Climates », tiré de *Modern Concrete Technology Series*, édité par A. Bentur et S. Mindess. E&FN SPON, 1995, p. 244.

ROWAN, WILLIAMS, DAVIES et IRWIN. *Drying characteristics in timber frame walls of low-rise residential housing*, préparé avec Scanada Consultants Limited, rapport 487-1400-1, soumis à la SCHL, Ottawa, 1988.

RWDI ET SCANADA CONSULTANTS LIMITED. *Drying Characteristics in Timber Frame Walls of Low Rise Residential Buildings: Final Report*, rapport destiné à la SCHL, 1988.